

UNIVERSITÉ DE DIJON
Année scolaire 1944 1945

FACULTÉ DES SCIENCES

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE DIJON

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

RAYMOND-FÉLIX SIMONIN

INGÉNIEUR CIVIL DE LA MÉTALLURGIE ET DES MINES
CAPITAINE DU GÉNIE

**LA PRÉPARATION ET L'ÉPANDAGE
SIMULTANÉS
DES LIANTS ROUTIERS**

Soutenue le 17 février 1945

JURY	{	MM. SIMON,	{	<i>Président.</i>
		BOUTARIC,		<i>Assesseurs.</i>
		BOUCHARD,		

DIJON
IMPRIMERIE BERNIGAUD ET PRIVAT
1945

**LA PRÉPARATION ET L'ÉPANDAGE
SIMULTANÉS
DES LIANTS ROUTIERS**

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE DIJON

ADMINISTRATION :

MM. BUGNON, doyen ; LAGRANGE, assesseur ; VIAN, secrétaire.
MM. BATAILLON, RECOURA, doyens honoraires.
MM. METZNER, TOPSENT, VOISENET, professeurs honoraires.

PROFESSEURS :

MM.

BOUTARIC, Physique générale ;
BUGNON, Botanique ;
CIRY, Géologie, Géographie physique et Minéralogie ;
DECOMBE, Chimie ;
DENIS, Zoologie et Physiologie animale ;
GEVREY, Mécanique rationnelle et appliquée ;
LAGRANGE, Calcul différentiel et intégral ;
LOMBARD, Chimie générale ;
MEYER, Chimie appliquée ;
SIMON, Physique.

CHARGÉS DE COURS COMPLÉMENTAIRES

MM.

AMIOT, docteur ès-sciences, Physique générale ;
BOUCHARD, docteur ès-sciences, Physique industrielle ;
DURRANDE, agrégé de sciences mathématiques, Mathématiques
générales ;
TUOT, docteur ès-sciences, Chimie S.P.C.N.

CHEF DE TRAVAUX

MM.

BELLET, Maître de conférences adjoint, Chimie.
DOLADILHE, docteur ès-sciences, Physique.

ASSISTANTS :

MM.

AMIOT, Physique générale ;
ARNAL, Botanique ;
BOUCHARD, Physique industrielle et Physique S.P.C.N. ;
CHAUDONNERET, Zoologie ;
M^{me} GUYARD, Chimie générale ;
M^{lle} MATHEY, Chimie appliquée ;
TINTANT, Géologie.

UNIVERSITÉ DE DIJON
Année scolaire 1944 1945

FACULTÉ DES SCIENCES

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE DIJON

POUR OBTENIR

LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

RAYMOND-FÉLIX SIMONIN

INGÉNIEUR CIVIL DE LA MÉTALLURGIE ET DES MINES
CAPITAINE DU GÉNIE

**LA PRÉPARATION ET L'ÉPANDAGE
SIMULTANÉS
DES LIANTS ROUTIERS**

Soutenue le 17 février 1945

JURY	{	MM. SIMON,	{	<i>Président.</i>
		BOUTARIC,		<i>Assesseurs.</i>
		BOUCHARD,		

DIJON
IMPRIMERIE BERNIGAUD ET PRIVAT
1945



INTRODUCTION

« J'étais alors en Allemagne, où l'oc-
« sion des guerres qui n'y sont pas encore
« finies m'avait appelé... »

DESCARTES.

C'est au cours de longues journées de méditation d'une captivité que nous est venue l'idée de jeter les grandes lignes du présent mémoire. Il nous restait alors deux biens immenses : tout notre temps et une propriété inviolable, pure expression de la propriété de l'homme : notre pensée.

Elle était souvent avec les poètes, les compositeurs, les artistes, les créateurs. Mais elle était plus souvent encore avec les chercheurs, connaissant bien leur existence difficile, leurs soucis, mais aussi leurs joies splendides. Un souvenir d'Edison, qui s'y connaissait dans la recherche pour des applications intéressées, nous revenait souvent à l'esprit. Avec sa raison toute positive ne disait-il pas que dans toute invention il y a 1 pour cent d'imagination et 99 pour cent de transpiration ?

Nous pensions combien cette relation d'Edison fut étroitement vérifiée au cours de la réalisation de l'invention dont le présent mémoire constitue un bref exposé. Si nous employons le mot d'invention, c'est qu'il s'agit bien d'une nouveauté au sens industriel. Elle a fait l'objet de brevets délivrés en France avec les avantages et les inconvénients de notre législation centenaire sur la propriété industrielle. Les brevets correspondants ont été déposés dans d'autres pays notamment en Grande-Bretagne, aux États-Unis et en Allemagne où ils ont été accordés après l'examen légal préalable, selon la procédure minutieuse en usage dans ces pays.

La nouveauté, caractère essentiel d'une invention, se trouve ainsi établie de la manière la plus certaine dont peut faire état un inventeur. Les Patent-Offices de Londres et de Washington, le Patentamt de Berlin emploient, en effet, une telle armée de spécialistes, d'ingénieurs et de juristes disposant de telles montagnes de documents, que le crible de leurs examens attache à l'invention un maximum de chances d'originalité.

Afin d'éviter une auto-opposition par l'un de ces examinateurs, pour la délivrance des brevets, aucune étude sur le sujet n'a paru dans la presse technique française. Seule la revue italienne *Le Strade* en a donné un aperçu très sommaire dans son numéro de mai 1938.

Ce travail n'a pas la prétention d'être complet et d'épuiser le sujet très vaste que son titre semble promettre.

Dans une première partie, on trouvera l'exposé de la genèse de l'invention avec son application au laboratoire de la préparation des liants.

Une deuxième partie analyse, dans les détails, le mécanisme de l'épandage d'un liant en couche uniforme.

La troisième partie est consacrée aux applications de l'invention à l'échelle industrielle.

Nous espérons cependant que ce travail sera utile non seulement aux industriels, mais surtout aux ingénieurs éclairés qui ont la sévère mission de maintenir en état notre innombrable réseau routier et d'en rechercher les qualités toujours plus conformes aux besoins de la circulation.

PREMIÈRE PARTIE

L'ÉJECTEUR-TOURBILLON

« Rien n'est plus trompeur qu'une idée
simple et distincte. »

Maurice DE BROGLIE.

CHAPITRE PREMIER

Les systèmes spirales

Des solitudes immenses de l'espace intersidéral jusqu'au champ restreint de l'objectif microscopique, un esprit curieux peut observer des systèmes dont la représentation est spirale.

C'est au ^{xix}^e siècle qu'on découvrit que certaines nébuleuses avaient une structure spiralée. Mais c'est à la sagacité de Herschel que l'on doit la résolution des premières nébuleuses. Cette forme qui paraissait fortuite a été reconnue depuis comme universelle et l'on évalue à deux millions le nombre des objets de ce type singulier et accessibles pour le moment à nos investigations.

L'éloignement de ces mondes est prodigieux, aussi désigne-t-on encore les nébuleuses spirales sous le nom de nébuleuses ultragalactiques. La spirale d'Andromède, tout juste visible à l'œil nu, mais observable dans une bonne jumelle, est éloignée d'un million d'années lumière. Toutes ces spirales s'éloignent de nous et leur fuite est proportionnelle à leur distance. La voie lactée ne serait qu'une nébuleuse spirale que nous voyons de l'intérieur.

Ces spirales ou galaxies tournent très vite autour de leur centre, mais pas comme un corps solide. Les régions centrales font beaucoup plus de tours que les bords. Ce phénomène, appelé rotation différentielle est conforme à la troisième loi de Képler.

L'observation directe et la photographie montrent que la partie centrale des nébuleuses émet une lumière dont l'intensité est maximum. Elle correspond à une énergie mise en jeu considérable.

En outre, la mécanique statistique montre que les milliards d'étoiles qui constituent ces nébuleuses sont disposées sur des spirales logarithmiques superposables par rotation des spires autour du centre asymptotique.

Un catalogue complet des nébuleuses spirales connues est tenu constamment à jour par les astronomes de l'école américaine. L'astronome français de Kerolys s'est spécialisé, à Forcalquier, dans la photographie de ces nébuleuses.

A l'échelle terrestre, on connaît des météores appelés typhons ou cyclones. Ils se produisent au voisinage des côtes de Chine, du Japon, du Bengale, de Madagascar et à certaines saisons. Le phénomène voyage et son centre se déplace suivant une trajectoire plus ou moins compliquée. L'approche du typhon est décelée par une chute rapide de la pression barométrique qui peut atteindre $10 \frac{m}{m}$ de mercure en une heure. La surface intéressée par les typhons a, comme ordre de grandeur, des cercles de plusieurs centaines de kilomètres de rayon. Il est extrêmement dangereux pour un bateau de naviguer dans la région centrale des typhons non seulement à cause de la vitesse énorme des vents qui y règnent, mais aussi par leur saute brusque. Le nombre de bateaux perdus dans les typhons est très grand et l'on évalue à plusieurs milliers le nombre des victimes humaines annuellement dues à ce fléau.

Les observations tendent à prouver que les lignes de courant des particules d'air dans les typhons sont des spirales logarithmiques. L'angle constant que fait la tangente à ces lignes de courant avec le rayon vecteur serait d'environ 60° . Le sens de rotation est en relation directe avec le mouvement de la terre. Il change quand on passe de l'hémisphère boréal à l'hémisphère austral, où il est le même que celui des aiguilles d'une montre.

Les isobares ou courbes d'égale pression atmosphérique sont des courbes fermées concentriques, théoriquement circulaires. Le tracé de ces isobares sur une carte à l'aide de renseignements émis par des observatoires dispersés, par radio, permet de déterminer le centre du phénomène à chaque instant. Les coordonnées de ce centre sont transmises aux navires par radio ; ils doivent manœuvrer de façon à le fuir.

Les tornades sont des météores analogues aux typhons, mais dont le diamètre est généralement inférieur à 1.500 mètres. La

giration est également réglée dans la plupart des cas par la rotation terrestre.

Ces tornades se produisent parfois en Amérique du Nord et aux Indes ; mais elles peuvent également se manifester en Europe.

Leur passage est remarquable par les phénomènes qu'elles entraînent.

Voici ce qu'écrivait le professeur Bouasse ⁽¹⁾ à ce sujet :

« Au passage d'une tornade, le baromètre indique une dépression brusque étroitement localisée. Le 18 juin 1897, une petite tornade passe sur Asnières, où le baromètre descend de 9 $\frac{m}{m}$; le baromètre de Saint-Ouen, distant de 600 mètres ne bouge pas. Le 17 novembre 1898, une tornade traversa Bizerte et fit descendre de 35 $\frac{m}{m}$ les baromètres de deux navires.

« Dans l'Amérique du Nord où les tornades sont violentes et fréquentes, les maisons *explorent* sous les excès de poussée de la pression atmosphérique intérieure.

« Une baisse de 10 $\frac{m}{m}$ à l'extérieur correspond à un excès de pression de 136 kilos par mètre carré de la pression intérieure. « Quant aux effets de succion, on en a collectionné d'incroyables : « personnes transportées à une centaine de mètres ; — charrette pesant 1.600 kilos passant sur une clôture de 1^m80 et allant tomber à 18 mètres de son point de départ ; — toitures se promenant dans les airs ; — cabannes emportées dans les airs et explosant en mille pièces ; — étangs pompés et poissons retrouvés au loin dans la plaine environnante ; — feuilles de zinc transportées à 20 kilomètres ou plus ».

On signale par ailleurs la formation de grêlons monstrueux pouvant contenir des morceaux de gypse, voire une tortue de 15 centimètres sur 20. Cette glace est probablement due à l'évaporation rapide de l'eau dans la tornade.

Les trombes marines se rencontrent souvent en Méditerranée par temps calme. Elles prennent naissance entre la surface de la mer et un cumulo-nimbus. Les particules fluides d'une trombe sont soumises à un mouvement giratoire intense qui entraîne des effets de succion eux-mêmes très intenses. La masse d'eau déplacée par une trombe peut atteindre des centaines de tonnes. Elles peuvent

(1) BOUASSE, *Tourbillons, Forces acoustiques. Circulations diverses*, t. I, p. 189.

d'ailleurs se produire à la surface terrestre et vider ainsi des étangs. Certaines de ces trombes ont pu être cinématographiées.

On cite également des trombes qui se forment dans les déserts, au voisinage des Pyramides notamment ; elles aspirent des sables sous forme de colonnes grossièrement cylindriques dont le diamètre peut atteindre cinq à six mètres. Le sable ainsi aspiré peut s'élever à de fort grandes hauteurs pour retomber en pluie.

Typhons, tornades, trombes, que nous venons de décrire sommairement par leurs effets propres, ne sont, en définitive, que des manifestations de la turbulence atmosphérique terrestre d'un même type, mais suivant des échelles variables et pour lesquelles on pourrait définir d'une façon différente l'étendue de la particule d'air.

Des mouvements giratoires comparables à ceux qui viennent d'être cités pour l'atmosphère se produisent également dans les milieux liquides. Au bord de la mer, en rivière, se forment de gros tourbillons. On les observe particulièrement bien en aval des piles de pont. Le mouvement spiral n'est pas douteux pour l'observateur le moins averti. On sait également que les tourbillons sont très dangereux pour les baigneurs ; lorsque leurs dimensions sont suffisantes, ils deviennent vite mortels pour eux.

Si l'on fait vibrer une goutte d'eau disposée sur la platine d'un microscope, par un moyen quelconque — ultra-sons, courant alternatif, quartz piézoélectrique — on observe des micro-tourbillons qui se propagent à la surface de la goutte liquide. Des amibes ou protozoaires vivant en suspension dans la goutte d'eau sont littéralement poignardés par les micro-tourbillons.

On connaît enfin un grand nombre de phénomènes dits phénomènes de *cavitation* qui prennent naissance dans l'écoulement d'un liquide. Ils sont caractérisés par la formation d'une cavité ou trou d'air en relation avec la giration du liquide. Léonard de Vinci y a fait allusion. Mais ce n'est qu'à l'apparition des turbo-machines que leur étude a pu être abordée. Les phénomènes d'érosion sont liés à ceux de la cavitation et on sait leur importance dans la tenue des hélices marines, des injecteurs de roues Pelton, des roues de pompes centrifuges.

Les mouvements à trajectoires spirales, la plupart logarithmiques

qui viennent d'être décrits sommairement et dont les exemples ont été choisis dans les échelles astronomique, atmosphérique, macroscopique et microscopique ont un caractère commun :

La vitesse des particules fluides, c'est-à-dire en définitive leur énergie cinétique, augmente considérablement quand elles se rapprochent du centre.

De plus au voisinage de ce centre et par suite de l'accroissement de cette forme de l'énergie mise en jeu, on constate des manifestations remarquables de cette énergie conduisant la plupart du temps à des effets destructeurs particulièrement sensibles.

CHAPITRE II

Mouvement d'un fluide parfait en spirale logarithmique Utilité hydraulique du mouvement Réflexions et Observations sur le mouvement tourbillonnaire de l'eau

MOUVEMENT D'UN FLUIDE PARFAIT EN SPIRALE LOGARITHMIQUE

Recherches théoriques

Les mouvements précédents, caractérisés par des trajectoires spirales logarithmiques des particules fluides et au centre desquels se produisent des phénomènes particulièrement intenses sont intéressants à analyser.

L'écoulement d'un fluide parfait suivant de telles trajectoires mérite donc de retenir l'attention du chercheur et s'annonce *a priori* fertile en conséquences.

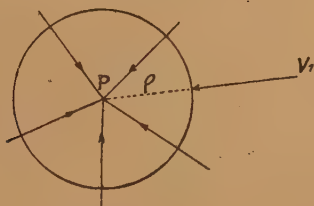
La mécanique des fluides parfaits qui étudie de tels écoulements a été obligée de s'élaborer en tenant compte de certaines hypothèses initiales dont le but essentiel est de faciliter les calculs en simplifiant les choses. Parmi ces hypothèses figure en premier lieu la suppression des viscosités. Cette suppression se traduit par l'absence de forces internes obliques. On obtient ainsi des équations relativement maniables. Le physicien essaie ensuite d'en tirer le meilleur parti et de faire *coller* avec des résultats d'expérience, ce qui est assez rare.

On utilise souvent avec avantage les fonctions complexes qui permettent notamment de préciser les mouvements des fluides en définissant les lignes de niveau et les lignes de courant qui, on le

sait, forment un système de courbes orthogonales. On peut toutefois se rendre assez exactement compte de tels mouvements sans faire appel à la théorie des nombres imaginaires. L'exemple suivant en est un témoignage.

Puits. — Un puits est caractérisé par un écoulement radial dans un plan, vers un point P.

PUITS



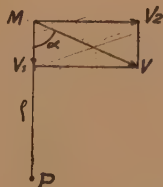
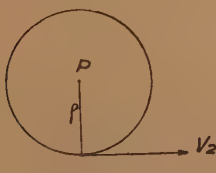
Le débit à travers un cercle de rayon ρ est égal au débit Q du puits. Soit V_1 la vitesse des particules fluides à la distance ρ du point P.

$$Q = 2 \pi \rho V_1 \quad \text{donc} \quad V_1 = \frac{Q}{2 \pi} \cdot \frac{1}{\rho} = \frac{A}{\rho}$$

en posant $A = \frac{Q}{2 \pi}$

Tourbillon. — Un écoulement tourbillonnaire autour d'un centre P est un écoulement dans lequel les lignes de courant sont des cercles de centre P. Si l'écoulement est irrotationnel, la circulation

TOURBILLON



de la vitesse le long d'une ligne de courant fermée est constante, soit B_0 .

La circulation de la vitesse V_2 le long de la circonférence de rayon ρ est ainsi :

$$2 \pi \rho V_2 = B_0 = C^{\text{te}}$$

d'où

$$V_2 = \frac{B_0}{2 \pi} \cdot \frac{1}{\rho} = \frac{B}{\rho} \text{ avec } B = \frac{B_0}{2 \pi}$$

On démontre, d'autre part, en mécanique des fluides que si l'on a trouvé deux écoulements dérivant respectivement des potentiels Φ_1 et Φ_2 , ils peuvent se combiner pour donner un écoulement résultant dont le potentiel est $\Phi_1 + \Phi_2$.

Or les deux écoulements du puits et du tourbillon dérivent précisément de deux potentiels. L'écoulement résultant de leur superposition conduira à un écoulement appelé *Puits-Tourbillon*. La vitesse V , des particules fluides située à la distance ρ du centre P sera la résultante des vitesses composantes V_1 et V_2 . La vitesse résultante V fait ainsi avec le rayon vecteur ρ de la courbe résultante un angle α tel que :

$$\text{tg } \alpha = \frac{V_2}{V_1} = \frac{B}{A} = C^{\text{te}} = \frac{B_0}{Q}$$

Cette courbe résultante ainsi définie est précisément *une spirale logarithmique*.

Nous insistons sur l'hypothèse, à ne pas perdre de vue, dans l'exemple qui précède : celle de l'absence complète de viscosité dans le fluide étudié. Il est cependant possible d'introduire ce paramètre dans l'étude du mouvement radial dans le plan des fluides visqueux ou le mouvement voisin du mouvement radial : le mouvement en spirale logarithmique des fluides visqueux.

Nous renvoyons le lecteur aux travaux du professeur Rosenblatt, de l'Université de Cracovie ⁽¹⁾ ou aux recherches de Faxen Olsson sur les mouvements en spirales logarithmiques entre deux parois ⁽²⁾. A notre connaissance, l'extension de ces considérations aux mouvements dans l'espace visqueux n'a pas été abordée.

De telles études seraient cependant d'un grand intérêt, car nous pensons qu'aucune recherche théorique aujourd'hui entreprise n'est susceptible de recevoir, demain au moins, une application dans le

⁽¹⁾ ROSENBLATT, *Sur certains mouvements des liquides visqueux incompressibles*

⁽²⁾ FAXEN ET OLSSON, *Laminare Bewegung Zäher Flüssigkeit in logarithmischen spiralen* (*Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik*, t. VII, 1927).

domaine physique. Les difficultés sont certes réelles, mais non insurmontables.

UTILITÉ HYDRAULIQUE DU MOUVEMENT

L'étude théorique des mouvements des fluides en général et des liquides en particulier ou hydrodynamique conduit les ingénieurs et les physiciens à l'hydraulique. La principale préoccupation de l'hydraulicien est l'étude des turbo-machines. Les turbines ont pour objet la production d'énergie, ou mieux, la transformation de cette énergie sous sa forme la plus noble : l'énergie électrique. Il faut donc s'attendre à voir les recherches théoriques de la mécanique des fluides appliquées surtout aux turbines. C'est précisément le cas du puits-tourbillon dont la première application semble due à l'Autrichien Reifenstein. Cette application fait l'objet des brevets français nos 600.316 et 723.297. Ils sont exploités en France par les Ateliers Neyret-Beylier, à Grenoble. Elle est connue sous le nom de Turbine-Tourbillon. « Ces turbines, dit une notice de cette maison, sont des « moteurs hydrauliques à admission totale, dans lesquels l'eau arrive « sur la roue motrice avec des angles d'entrée convenables, grâce « uniquement à la forme spécialement étudiée de la *baché spirale* « qui constitue le *seul organe de distribution* ». Le réglage du débit se fait à l'aide d'un vannage très ingénieux, constitué par un profilé lui-même en arc de spirale qui laisse aux filets liquides leur forme idéale. Ces machines à grand rendement utilisent l'énergie cinétique des particules d'eau à une certaine distance de l'axe de rotation. La région du centre n'intervient pas ; c'est une zone considérée comme dangereuse. Il importe, en effet, d'éloigner les particules liquides de l'axe pour éviter les effets de cavitation : pour obtenir ce résultat on aère la partie centrale.

Expériences hydrodynamiques

Si la bache spirale a reçu des applications dans le domaine des moteurs hydrauliques, il est manifeste que, dans ces applications, la partie centrale, la plus curieuse cependant à l'œil de l'observateur, a été soigneusement évitée. L'étude de cette région devait cependant être entreprise et nous avons pensé que de cette étude pouvait naître

tre un certain nombre de solutions à divers problèmes. Nous avons été ainsi amené à étudier le mouvement d'un liquide réel de faible viscosité relative s'écoulant dans un cylindre spiral, à la manière des météores qui ont été décrits.

A cet effet, nous avons construit un cylindre spiral en bronze S_1 (fig. 1), dont la tubulure d'entrée est filetée pour recevoir un tube standard 26×34 . Les flasques du cylindre sont plans et munis de deux larges ouïes coaxiales susceptibles de recevoir soit des bouchons filetés, soit des orifices de forme et de dimensions choisies d'après différents calculs ou selon certaines idées particulières. Ces orifices, eux-mêmes filetés dans ce but, sont munis d'une rainure de centrage. Les dimensions adoptées sont les suivantes :

diamètre des ouïes ou des grands orifices filetés au pas de 100 : 40 millimètres ;

hauteur du cylindre spiral ou distance entre flasques : 30 millimètres.

Ce cylindre nous a permis de réaliser un certain nombre d'expériences qui ont eu pour conséquence d'aiguiser notre curiosité. Un tel appareil ne permettant guère l'observation directe du mouvement liquide, la fabrication d'un cylindre d'observation fut entreprise. Ce cylindre avait exactement les mêmes caractéristiques que le précédent, mais comprenait, en outre, un dispositif optique permettant l'éclairage du mouvement intérieur, en vue soit d'observer les phénomènes à l'œil nu, soit de les projeter sur un écran, soit de les photographier commodément.

Ce dispositif est constitué par deux lames de verre à faces parallèles A et B et par un système de lentilles convergentes C formant objectif photographique. La photographie n° 1 ci-jointe montre cet instrument d'observation. La figure 2 en représente une coupe horizontale, avec la marche d'un faisceau lumineux. La mise au point du système optique est faite sur l'axe vertical du cylindre spiral.

L'eau a été choisie comme liquide d'observation, parce que c'est le liquide qu'il est le plus commode de se procurer aisément sous pression. La canalisation urbaine de Dijon où ont été réalisées les expériences donne, en effet, un bon débit sous une pression pouvant atteindre 4 kilos. La température de l'eau en circulation

BREVETE S.G.D.G.
FRANCE - ETRANGER.

CYLINDRE SPIRAL S1

MODELE 38

BRONZE

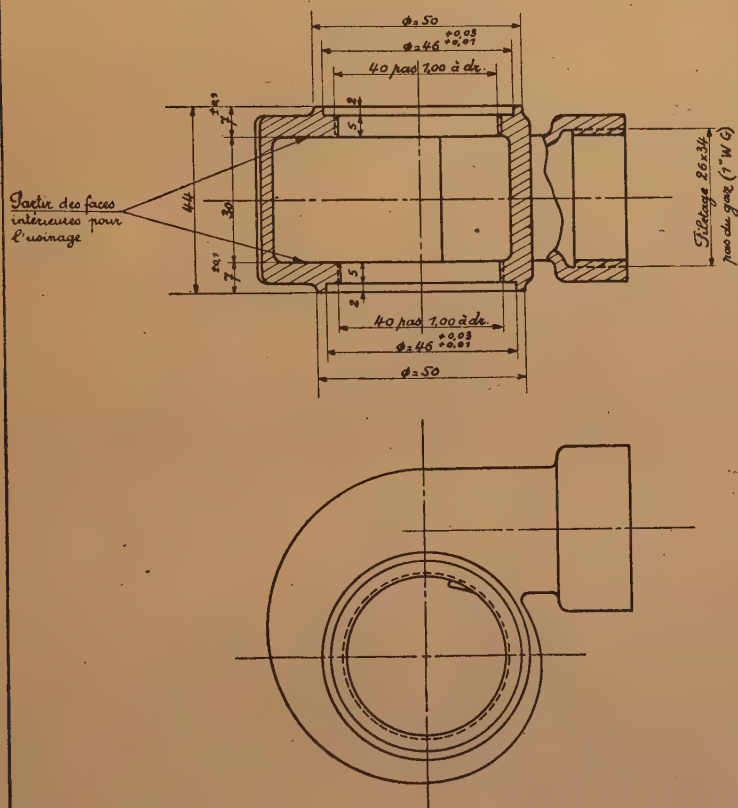


Fig. 1.

Vue en coupe et en plan du cylindre spiral réalisé en bronze.
De nombreux ajutages peuvent y être adaptés pour réaliser
divers montages expérimentaux.

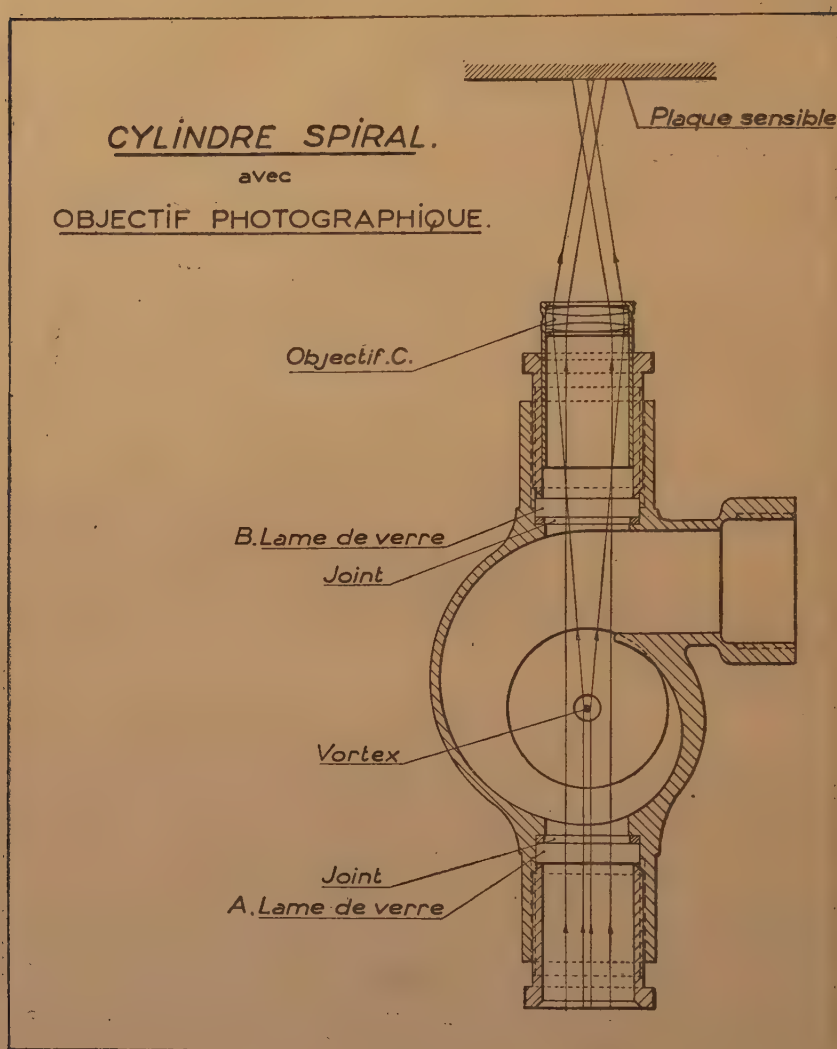


Fig. 2.

L'objectif photographique adapté au cylindre spiral permet l'observation, la projection, la photographie et la cinématographie du mouvement turbulent des liquides transparents.

entraîne toutefois la condensation de vapeur d'eau sur les lentilles et lames de verre, gênant ainsi la marche des rayons. Pour remédier à cet inconvénient, il est nécessaire d'enduire les lentilles et lames de verre d'une cire anti-buée.

Conditions de l'expérience. — Sur les ouïes du cylindre spiral sont vissées des orifices ou tuyères coaxiaux. On choisit de préférence des orifices ou tuyères en forme de veine moulée, de quelques millimètres de diamètre. Mais la forme des orifices peut être choisie de façon différente sans modifier d'une façon importante les résultats d'observation.

On envoie alors de l'eau sous pression par la tubulure d'amenée.

Remarques. — Le mouvement permanent une fois établi, on constate la formation d'une cavité cylindrique, très fine, dans l'axe géométrique du cylindre. Cette cavité ou vortex se forme *quelle que soit la pression* de l'eau. Son diamètre varie avec la pression et les dimensions des orifices. Tout se passe comme si le liquide était traversé par une fine aiguille d'air. Le phénomène disparaît si l'on obstrue l'un des orifices, mais reparaît avec sa réouverture.

La photographie n° 2 montre l'aspect du phénomène.

Il correspond à un orifice supérieur de 6 millimètres en veine moulée et muni d'un tube caoutchouc d'évacuation d'eau, à un orifice inférieur cylindrique de 2 millimètres de diamètre.

Pression : 4 kilogrammes environ.

Temps de pose : 1/100^e de seconde.

La pression atmosphérique règne à l'intérieur de la minuscule cheminée d'air, formant surface isobare.

On observe sur la photographie la silhouette rectiligne de la méridienne de la surface de révolution dont l'axe coïncide avec celui du cylindre spiral. La stabilité du phénomène est particulièrement remarquable.

La mesure des débits donnés par de tels orifices avec ou sans phénomène tourbillonnaire a fait l'objet de nombreux mémoires. Ces derniers concordent, en général, pour conclure que ce débit diminue quand se produit une rentrée d'air.

RÉFLEXIONS ET OBSERVATIONS
SUR LE MOUVEMENT TOURBILLONNAIRE DE L'EAU

Ce qui surprend dans cette expérience, c'est ceci : quelle que soit la pression d'eau à l'entrée du cylindre spiral, la pression atmosphérique est suffisante pour régner au voisinage de l'axe.

On sait que dans de tels écoulements les particules d'eau se déplaçant dans un plan perpendiculaire à l'axe n'échangent ni ne perdent aucune énergie. Ceci se justifie par l'application du théorème des moments cinétiques d'Euler.

Si r désigne la distance à l'axe de la particule, v la vitesse dans le plan perpendiculaire à cet axe, ce théorème donne la relation

$$v \cdot r = C^{\text{te}} \quad (1)$$

dont la courbe représentative, est une hyperbole équilatère.

Cette hyperbole équilatère donne ainsi la vitesse des particules d'eau en fonction de leur distance à l'axe (fig. 3).

On sait également que, pour l'eau, on peut appliquer l'équation de Bernouilli au tube de courant qui comprend la particule envisagée, à savoir :

$$\frac{P_0}{\pi} + \frac{V_0^2}{2g} + Z_0 = \frac{P}{\pi} + \frac{V^2}{2g} + Z = C^{\text{te}} \quad (2)$$

P_0 , V_0 , Z_0 étant respectivement la pression, la vitesse et l'altitude au point homologue de la surface libre du château d'eau, P , V , Z étant les mêmes quantités rapportées à la particule considérée, le mouvement étant supposé permanent. π est le poids spécifique de l'eau, g l'accélération de la pesanteur.

Supposons $P_0 = H$ ou pression atmosphérique. Si le château d'eau est de grandes dimensions, $V_0 = 0$. Si l'on choisit le plan de la particule comme plan de référence, on a $Z = 0$. L'équation (2) devient :

$$\frac{P}{\pi} + \frac{V^2}{2g} = H + Z_0$$

Or d'après la relation (1) nous savons que la vitesse v est très grande au voisinage de l'axe, c'est-à-dire pour r très petit. Le terme en $V^2/2g$ croît bien plus vite encore. La somme des énergies-pression

et cinétique restant positive et constante, il en résulte que la pression peut devenir *fortement négative* au voisinage de l'axe.

L'hyperbole des vitesses par rapport aux distances à l'axe (fig. 3) comprend un certain point A pour lequel la vitesse est donnée par la formule :

$$v = \sqrt{2g(H + Z)}$$

et dont l'abscisse r_0 correspond à

$$r_0 \times \sqrt{2g(H + Z)} = \text{Cte}$$

Aux coordonnées ainsi définies du point A, correspond également une pression nulle.

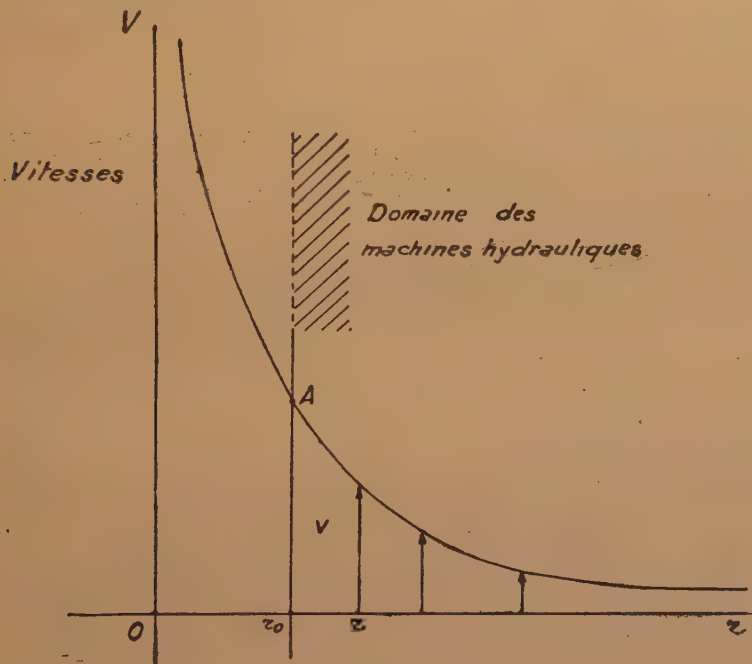


Fig. 3.

A droite de cette ordonnée se trouve le domaine des vitesses admissibles dans les moteurs ou machines hydrauliques.

A gauche de cette ordonnée se trouve le domaine de la cavitation ou des vitesses dangereuses dans lequel la pression absolue s'abaisse à une valeur telle qu'elle met des parties métalliques de ces ma-

chines en danger d'érosion. Les effets de la cavitation sont souvent désastreux ; on les attribue à des percussions mécaniques dues à l'ébullition de l'eau à basse température sous les très basses pressions locales.

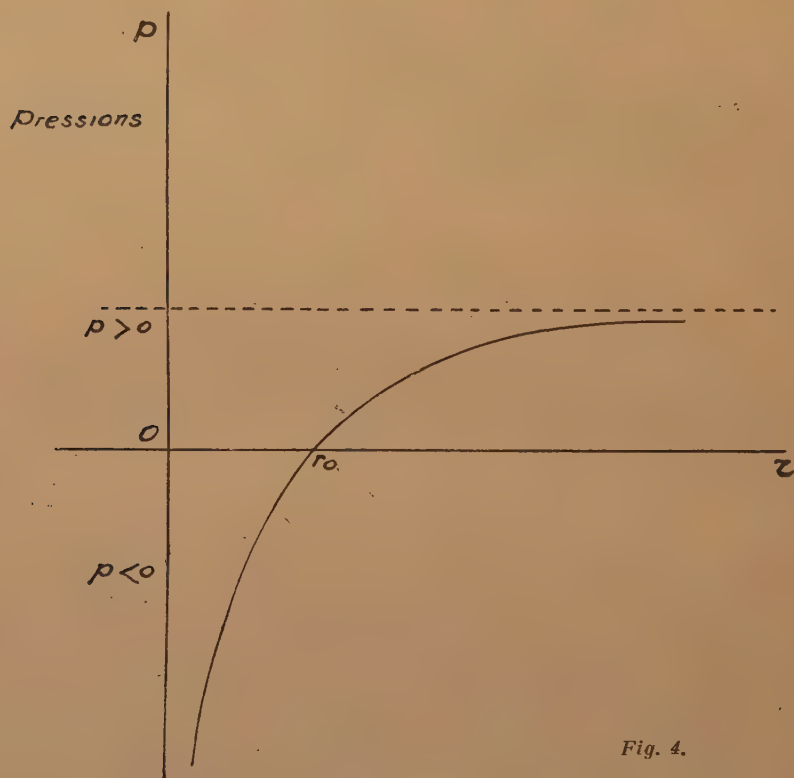


Fig. 4.

Les *isobares* du mouvement spiral sont définies par la relation $p = C^{te}$; cette condition entraîne $v = C^{te}$ du fait de l'équation de Bernouilli, c'est-à-dire dans un plan perpendiculaire à l'axe $r = C^{te}$. Cette dernière relation définit une circonférence. Les surfaces isobares sont bien des cylindres droits à base circulaire. Les photographies illustrent cette démonstration.

La courbe représentative des pressions en fonction des distances à l'axe a l'allure indiquée sur la figure 4. L'équation correspondante est de la forme

$$p = B - \frac{C}{r^2}$$

La variation de pression dp , quand on passe de la circonférence isobare de rayon r à l'isobare $r + dr$, est ainsi :

$$dp = \frac{C \cdot dr}{r^3}$$

Imaginons une bulle de gaz de diamètre dr supposée sphérique dont un pôle se trouve à l'instant t à la distance r de l'axe du cylindre spiral. Cette bulle de gaz est entraînée avec une vitesse inversement proportionnelle à la distance à l'axe, suivant une trajectoire spirale. Par ailleurs, les pôles de la bulle gazeuse sont soumis à des pressions sensiblement différentes. Le mouvement résultant de la bulle échappe à l'analyse et l'on ne peut que s'en remettre à l'expérience pour le connaître. Cette expérience montre que la bulle éclate en éléments extraordinairement ténus et que ceux-ci forment une émulsion gazeuse complètement opaque. Un faisceau lumineux de quelque intensité qu'il soit est arrêté par ce système singulier que les rayons du soleil lui-même sont impuissants à traverser.

Le phénomène rappelle les propriétés d'une certaine variété de silice amorphe appelée hydrophane et classée parmi les opales. Cette silice est normalement opaque ; imbibée d'eau, elle devient complètement transparente. Elle est constituée par de la silice dans laquelle se trouvent dispersées de très fines inclusions d'air qui empêchent totalement la réfraction de toute lumière (1).

Il est facile de tirer de cette constatation un grand nombre d'applications dans lesquelles on cherche à obtenir une grande surface de contact entre un liquide et un gaz.

(1) BOVASSE, *Capillarité. Phénomènes superficiels*.

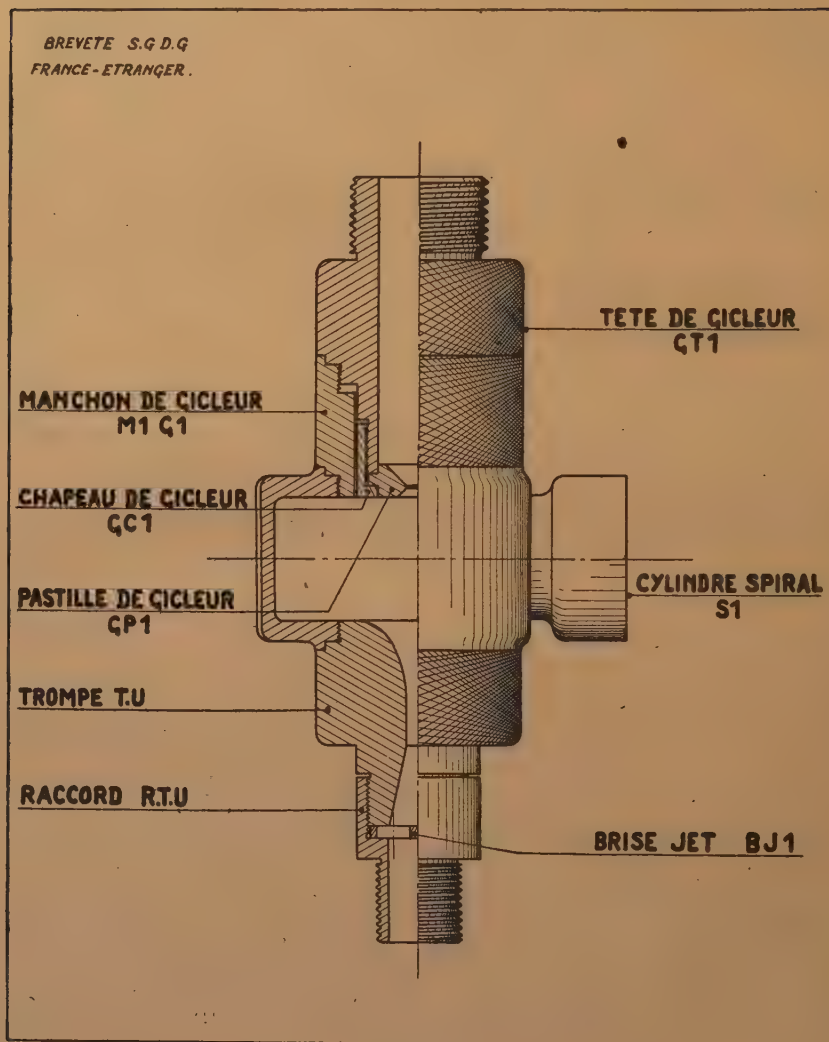


Fig. 5.

L'éjecteur-tourbillon vu en demi-coupe verticale. C'est un montage particulier de deux ajutages adaptés au cylindre spiral.

CHAPITRE III

Application à un émulseur : l'éjecteur-tourbillon Généralités sur la nature des mélanges obtenus

APPLICATION A UN ÉMULSEUR : L'ÉJECTEUR-TOURBILLON

Considérons maintenant le montage réalisé sur la figure 5. Dans ce montage, l'ouïe supérieure du cylindre spiral est aménagée en injecteur, comprenant une tête de gicleur GT_1 , un chapeau de gicleur GC_1 et un manchon de gicleur M_1G_1 . La pastille de gicleur GP_1 est facilement interchangeable. Sur l'ouïe inférieure est vissé un venturi ou trompe T.U., d'un diamètre convenable et munie éventuellement d'un brise-jet BJ_1 et d'un raccord R.T.U.

Nous supposons toujours, dans ce qui va suivre, que la section s de l'orifice de la pastille de gicleur GP_1 est toujours inférieure à la section S du col de la trompe T.U.

Si l'on envoie de l'eau sous pression par le gicleur, il se forme un jet cylindrique ou veine qui, rencontrant le brise-jet BJ_1 , vient coller à la paroi du venturi. Pour une pression d'eau suffisante (quelques kilos) un vide important est réalisé à l'intérieur du cylindre spiral dont on a bouché la tubulure d'entrée. La pression peut y baisser jusqu'à quelques centimètres de mercure. Le système fonctionne ainsi en trompe classique.

Nous appellerons *primaire* le fluide injecté par le gicleur suivant l'axe du cylindre. La pression primaire sera la pression du liquide primaire ou P_1 .

Envoyons maintenant une autre liquide par le cylindre spiral, liquide soumis à la turbulence ou *secondaire*. La pression secondaire

sera la pression du liquide secondaire ou P_2 . Nous supposons toujours que la pression secondaire est inférieure à la pression primaire. Prenons le liquide primaire constitué par du benzol coloré au rouge Soudan III, le secondaire étant de l'eau.

Les particules de benzol rencontrent les particules d'eau au voisinage de l'axe, c'est-à-dire à l'endroit où les vitesses sont maxima et les pressions minima. On obtient finalement un mélange intime des deux constituants en utilisant les effets destructeurs décrits dans les trombes.

L'énergie dépensée dans le système est utilisée à diviser la matière. L'appareil fonctionne en mélangeur-atomiseur. Nous combinons ainsi l'effet de trombe avec l'effet de trompe. C'est la raison pour laquelle nous avons dénommé ce mélangeur *l'Ejecteur-Tourbillon*.

Utilisation de l'énergie Composantes de la vitesse des particules fluides

On remarquera que la division de la matière s'effectue par intervention de l'énergie cinétique des particules fluides de chaque espèce, lorsque le mouvement des deux fluides est devenu permanent.

Il paraît intéressant de rechercher toutes les formes de l'énergie cinétique d'une particule fluide dans un tel mouvement permanent. Pour obtenir cette dissection, il est commode de recourir à l'analyse du mouvement des points de chaque particule ⁽¹⁾. Celle-ci subit à chaque instant des changements de position, d'orientation, de grandeur et de forme. Une particule de centre C passe à l'instant t au point de coordonnées x, y, z , avec une vitesse de composantes

$$u(xyz) \quad v(xyz) \quad w(xyz)$$

Le point M de cette particule qui passe au même instant au point de coordonnées $x+h, y+k, z+l$ est animé d'une vitesse de composantes $u', v' w'$. Il est classique d'écrire :

$$\begin{aligned} u' &= u + \frac{\partial u}{\partial x} h + \frac{\partial u}{\partial y} k + \frac{\partial u}{\partial z} l \\ v' &= v + \frac{\partial v}{\partial x} h + \frac{\partial v}{\partial y} k + \frac{\partial v}{\partial z} l \\ w' &= w + \frac{\partial w}{\partial x} h + \frac{\partial w}{\partial y} k + \frac{\partial w}{\partial z} l \end{aligned}$$

(1) A. FOCH, *Mécanique des fluides*,

Considérons les expressions :

$$\begin{aligned}\xi &= \frac{1}{2} \left[\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right] & g_1 &= \frac{1}{2} \left[\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right] \\ \eta &= \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right] & g_2 &= \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right] \\ \zeta &= \frac{1}{2} \left[\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right] & g_3 &= \frac{1}{2} \left[\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right]\end{aligned}$$

En introduisant ces expressions dans la relation précédente celle-ci prend la forme suivante :

$$\begin{aligned}u' &= u + \left[\eta l - \zeta k \right] + \left[h \frac{\partial u}{\partial x} + k g_3 + l g_2 \right] \\ v' &= v + \left[\zeta h - \xi l \right] + \left[k \frac{\partial v}{\partial y} + l g_1 + h g_3 \right] \\ w' &= w + \left[\xi k - \eta h \right] + \left[l \frac{\partial w}{\partial z} + h g_2 + k g_1 \right]\end{aligned}$$

La vitesse du point M apparaît ainsi comme la résultante de trois éléments :

1° Un élément dont les composantes suivant les trois axes sont u, v, w . Cet élément n'est autre chose que la vitesse du centre de la particule ou vitesse de *translation*. Cet élément crée en quelque sorte la circulation de la particule au sein du fluide.

2° D'un élément $\vec{V}_r$ ayant comme composantes :

$$\begin{aligned}u_1 &= \eta l - \zeta k \\ v_1 &= \zeta h - \xi l \\ w_1 &= \xi k - \eta h\end{aligned}$$

Cette vitesse correspond à une rotation d'ensemble de la particule autour d'un axe passant par le centre de la particule. Ce mouvement, considéré par rapport à des axes passant par le centre de la particule est animé de la vitesse de translation u, v, w , a pour composantes : ξ, η, ζ .

Ce vecteur est le tourbillon du champ des vitesses ou *curl*.

Cette vitesse permet l'échange d'énergie au sein des fluides incompressibles et, en définitive, l'opération du mélange.

3° D'un élément de composantes :

$$u_2 = h \frac{\partial u}{\partial x} + k g_3 + l g_2$$

$$v_2 = k \frac{\partial v}{\partial y} + l g_1 + h g_3$$

$$w_2 = l \frac{\partial w}{\partial z} + h g_2 + k g_1$$

On démontre que ces termes correspondent à une déformation de la particule fluide en considérant une quadrique de référence dite quadrique de déformation d'équation : $\Phi(h.k.l) = 1$.

Cette composante est celle qui donne à la particule sa forme particulière à l'instant t considéré. Elle constitue à ce titre un facteur important de la morphogénie micellaire.

Il est clair que, dans le mouvement étudié, les particules liquides soumises au mouvement spiral (secondaire) ont un vecteur tourbillon très intense. Le choc de ces particules avec les particules primaires, dont le tourbillon est beaucoup moins important, entraîne un échange d'énergie maximum d'où résulte la grande intimité du mélange.

Si l'écart des températures des deux liquides est suffisant, il peut arriver que les particules les plus visqueuses se refroidissent assez rapidement pour subsister dans leur forme instantanée. On a pu ainsi observer la forme ellipsoïdale des particules refroidies, forme due à la présence de la composante de la vitesse de déformation. Il est d'ailleurs impossible de prévoir cette présence, celle-ci ne semblant se manifester que pour certaines natures de fluides, c'est-à-dire en définitive pour certaines formes de molécules ou amas moléculaires.

L'industrie utilise un grand nombre d'appareils mélangeurs, agitateurs, atomiseurs dans lesquels les liquides en présence sont soumis à des mouvements qui se dérobent à l'analyse. Ces mouvements sont, en général, désordonnés et les particules ont des trajectoires mal définies. Si l'on examine de plus près l'opération du mélange, on remarque, au sein des liquides, les deux genres de mouvement :

Une circulation et des tourbillons.

Dans la région des tourbillons se produit effectivement le mélange : d'où l'importance du tourbillon dans les mélangeurs. Dans la

plupart de ces machines, il est impossible d'évaluer l'énergie utilisée à produire les tourbillons utiles.

Dans l'éjecteur-tourbillon, au contraire, l'énergie dépensée pour mélanger est proportionnelle à la chute de pression primaire, secondaire ; on peut donc s'attendre à obtenir des particules d'autant plus fines que cette différence sera plus forte. Rien ne s'oppose d'ailleurs à employer des différences énormes qui permettraient sans doute d'obtenir des résultats singulièrement intéressants en utilisant par exemple une énergie suffisante pour atteindre rapidement les dimensions moléculaires.

Nous croyons que d'importantes applications de tels échanges d'énergie sous forme cinétique pure sont susceptibles d'être réalisées notamment dans le domaine de l'hydrogénation des charbons où sont mises actuellement en jeu des énergies considérables sous la forme pression pure.

Quoiqu'il en soit, le mélangeur puits-tourbillon utilise pour l'obtention des mélanges une énergie *mesurable* et fixée à l'avance.

Utilisation de l'énergie

Nous avons admis que pour augmenter l'aire de la surface en contact de deux liquides d'une quantité infinitésimale dS , il est nécessaire de mettre en jeu un travail dT tel que :

$$dT = A. dS.$$

A représente la tension interfaciale entre les deux liquides dans les conditions de l'expérience. La tension interfaciale se définit ainsi : c'est le travail nécessaire pour accroître la surface de contact de l'unité d'aire.

L'équation ci-dessus est d'ailleurs homogène au point de vue dimensionnel, puisque l'on a bien :

$$M.L.T^{-2}.L = M.L.T^{-2}.L^{-1}.L^{-2}$$

Cette relation, appelée aussi relation de Gauss, est en outre conforme au principe physique suivant de Le Chatelier :

« La grandeur de la puissance mise en jeu dans un changement donné infiniment petit d'un système quelconque est proportionnelle à la grandeur de ce changement ».

$dT = F \cdot dl$ est la loi mécanique qui illustre ce principe, F représentant la force, dl le déplacement, dT représente le travail dépensé.

En électricité, $dT = E \cdot di$, E est la force électromotrice, di le changement de la quantité d'électricité.

En thermodynamique, $dT = t \cdot ds$, t étant la température absolue, ds étant la variation d'entropie.

Si l'on admet comme valable l'équation au départ $dT = A \cdot dS$, on est conduit à déduire que lorsque A est nul, le travail nécessaire à augmenter la surface de contact est nul. Ceci peut également s'exprimer en disant que la surface de contact de deux milieux pour lesquels la tension interfaciale est nulle, peut être augmentée indéfiniment sans aucune dépense d'énergie. On sait que la tension de deux milieux parfaitement miscibles est nulle. Les expériences de Lehmann ⁽¹⁾ prouvent, en outre, que la tension de la surface qui sépare deux milieux tend vers zéro à mesure qu'ils sont plus solubles l'un dans l'autre. Si l'équation de départ est bonne, le travail nécessaire à augmenter indéfiniment la surface de contact de deux liquides miscibles est nul. L'expérience quotidienne montre, en effet, qu'il n'est pas nécessaire de fournir du travail pour mélanger deux liquides parfaitement solubles. La solubilité d'un milieu dans un autre doit donc entraîner une augmentation infiniment grande des surfaces de contact, c'est-à-dire en définitive une extrême petitesse des particules dispersées par solution.

C'est précisément ce qu'a vérifié le Suédois Svedberg ⁽²⁾ au moyens de ses supercentrifugeuses ultra rapides. Il réussit, en effet, en 1935, à réaliser des vitesses de rotation de 145.000 tours-minute, ce qui lui permit d'obtenir une sédimentation mesurable des ions sodium et chlore d'une solution aqueuse de Na Cl. On peut ainsi montrer que ce qui sépare les solutions colloïdales des solutions vraies est une simple question de dimensions relatives des particules.

⁽¹⁾ BOUASSE, *Capillarité. Phénomènes superficiels*, p. 300.

⁽²⁾ *La Nature*.

GÉNÉRALITÉS SUR LA NATURE DES MÉLANGES OBTENUS

Considérons deux volumes égaux de deux phases liquides E et H, de natures différentes, non miscibles et non susceptibles de réagir chimiquement l'une sur l'autre. Imaginons que l'on passe ces deux phases à l'éjecteur-tourbillon et cherchons à prévoir la nature du corps résultant. Si l'énergie dépensée dans l'opération est suffisante, l'une des phases liquides va se disperser en particules plus ou moins fines dans l'autre phase.

La phase H se dispersera par exemple dans la phase E, cette dernière formant un milieu continu ou continuum; la phase H étant discontinue. On dit que H est dispersé dans E et l'on représente le système final par la notation H — E.

Mais rien ne s'oppose *a priori*, au contraire, à ce que ce soit la phase E qui se disperse dans la phase H et l'on peut assurer que la chance d'obtenir chaque système final est de $\frac{1}{2}$.

On peut également imaginer d'autres systèmes plus complexes, dont voici un exemple : les particules H du premier système (H—E) pourront contenir une ou plusieurs particules plus petites de phase E. Ce système correspondra à la notation (E—H)—E. On dira que l'on a affaire, dans ce cas, à un système *double*. Mais l'esprit peut parfaitement concevoir des systèmes beaucoup plus complexes ou systèmes multiples.

Les systèmes ainsi conformés pourront avoir une existence très éphémère et se résoudre en définitive dans les deux phases initiales. On dit alors que ces systèmes sont instables.

Il existe ainsi une incertitude sur la forme du système finalement obtenu et il est utile de connaître les facteurs qui interviendront dans la levée de cette incertitude. Il n'est, en effet, pas indifférent au point de vue technique d'obtenir tel ou tel système. Une certaine masse de cuivre liquide dispersée dans une certaine masse de fer fondu ne donnera pas au refroidissement un alliage ayant les mêmes propriétés que celles d'un alliage dans lequel le même fer serait dispersé dans la même masse de cuivre.

Une incertitude analogue se présente dans l'écoulement de l'eau d'un canal au travers d'une portière en mince paroi disposée dans

l'axe d'une section droite du canal. Lorsque l'on ouvre la portière, le courant ($1 \text{ m}^3\text{-sec.}$, pour fixer les idées) ne suit pas l'axe du canal, mais il est dévié soit sur une rive soit sur l'autre. Il existe une incertitude pour la déviation vers la rive droite ou vers la rive gauche. D'habiles observateurs ont réussi à montrer que l'on pouvait lever l'incertitude en plongeant un bâton dans l'axe du tourbillon localisé en amont de la portière sur l'une ou l'autre rive du canal. Cette incertitude se trouve ici levée apparemment par une simple action de présence. Une fois la déviation établie, il est impossible de la modifier. Pour obtenir la deuxième déviation, il est nécessaire de fermer la portière puis de l'ouvrir à nouveau en plongeant le bâton dans l'axe du tourbillon correspondant.

Bien que l'origine de la neige soit connue depuis des temps immémoriaux, ce n'est que très récemment qu'on a pu la reproduire artificiellement en partant de la vapeur d'eau convenablement refroidie. Toutes les tentatives de sa production artificielle étaient restées vaines. Le problème a été résolu grâce à l'inlassable patience du savant Japonais H. Hakaya. Ce dernier réussit à créer de la neige artificielle en tous points comparable à la neige naturelle en plaçant dans la vapeur d'eau saturée convenablement refroidie un poil de lapin. Les cristaux de neige se forment à partir d'un germe ou noyau dont il en existe une douzaine de variétés.

La présence d'un simple poil de lapin a ainsi levé récemment un voile séculaire sur la formation de la neige.

CHAPITRE IV

Cas des émulsions Réflexions sur la finesse de division Calcul des concentrations. Abaques

CAS DES ÉMULSIONS

On obtient des émulsions au moyen de l'éjecteur-tourbillon en utilisant comme constituants :

Phase *liquide E* : de l'eau, des solutions salines acides ou basiquées, des liquides organiques auxquels il convient d'ajouter un agent émulsif pouvant être un corps solide, liquide ou gazeux.

Phase *liquide H* : une phase huileuse : corps gras, corps résineux, goudrons, bitumes, solvants organiques, etc.

Les applications industrielles de ces émulsions sont nombreuses et une des plus importantes est attachée à la technique de la route moderne.

Les émulsions obtenues sont des deux types décrits : le type H — E ou émulsion *directe*, formée par dispersion de la phase huileuse dans la phase aqueuse.

Le type E — H ou émulsion *inverse*, formée par la dispersion d'eau dans l'huile.

En général, les émulsions directes sont caractérisées par une viscosité relativement faible par rapport à la viscosité des émulsions inverses correspondantes. Une comparaison vulgaire montre le lait comme type d'émulsion directe, le fromage comme type d'émulsion inverse. Le mot émulsion vient d'ailleurs du latin *emulgere* = traire.

Les propriétés physiques diffèrent très sensiblement d'un type à l'autre. Un type d'émulsion étant obtenu, on passe souvent à l'autre en ajoutant simplement un produit chimique judicieusement choisi. Le processus d'inversion, observable au microscope, a été décrit par Clayton (1). Toutefois, il est pratiquement impossible d'assurer *a priori* que l'on obtiendra avec deux phases données tel ou tel type d'émulsion.

L'expérience montre que suivant les corps en présence, on peut obtenir avec l'éjecteur-tourbillon l'un ou l'autre des systèmes soit par :

- a) le choix de l'émulsifiant ;
- b) la variation de la température des composants ;
- c) l'inversion du primaire en secondaire ;
- d) la modification de l'ordre d'introduction des corps dans le puits-tourbillon.

Le moyen *a* est un moyen purement *chimique*.

Le moyen *b* est un moyen *physique*.

Le moyen *c* est un moyen *géométrique*.

Le moyen *d* est un moyen de *préséance*.

Ces moyens ne s'appliquent d'ailleurs pas indistinctement. Ils peuvent être utilisés seuls ou combinés. Ils dépendent des corps que l'on veut mélanger. A titre d'exemple, le moyen chimique est efficace avec le bitume. Le moyen physique a été remarqué avec des émulsions de goudron dans lesquelles l'agent émulsif était constitué par des micro-cristaux de calcite. Le moyen géométrique a été constaté avec les mêmes constituants. Le moyen de préséance a été observé avec les émulsions de bitume ou de goudron à la caséine lactique.

On sait que Lavoisier avait remarqué que le résultat d'une opération de mélange de deux corps dépendait de la manière dont avait été fait le mélange.

Le moyen de préséance a été observé par Ostwald qui, le premier, a signalé l'existence de deux genres d'émulsion. Le choix de l'émulsif est habituellement le seul moyen admis par les chimistes et l'on connaît sous le nom de règles de Bathnagar (2) une classification

(1) CLAYTON, *The Emulsions*.

(2) LANGE, *La technique des émulsions*.

des émulsifiants suivant les deux genres d'émulsions. La valence des sels métalliques employés comme émulsifs déciderait du système obtenu.

Les deux autres moyens n'ont été signalés, à notre connaissance, par aucun auteur.

Tout se passe en réalité comme si le système obtenu dépendait de la présence ou de la formation d'un germe à l'origine de l'opération de mélange. Il semble que l'incertitude se lève par une simple action de présence et une analogie avec les cas signalés vient aussitôt à l'esprit. Retenons simplement que le mouvement permanent étant établi dans le mélangeur, et, le système décidé, celui-ci reste identique à lui-même. Pour le modifier, il faut avoir recours à l'un des moyens signalés.

Emulsions doubles ou multiples

Les émulsions de ce genre ont été étudiées par Clayton et plus particulièrement par le professeur Woodmann de Cambridge, en vue d'applications à l'horticulture. Nous avons pu observer des émulsions doubles de bitume obtenues en utilisant comme phase aqueuse une suspension naturelle de résidus de défécation de sucreries. Elles étaient constituées par des sphérules creuses de bitume contenant de l'eau dispersées elles-mêmes dans la suspension de micro-cristaux de calcite dans l'eau contenant également des matières organiques résiduelles.

Le microscope montrait également des micelles sphériques de bitume creuses, mais incomplètement fermées.

RÉFLEXIONS SUR LA FINESSE DE LA DIVISION

Nous avons admis que l'énergie dépensée dans l'éjecteur-tourbillon servait à augmenter la surface de contact des deux phases constituant une émulsion. L'accroissement de surface de la phase dispersée entraîne l'augmentation du nombre des micelles et la diminution corrélative du diamètre d'un certain nombre d'entre elles supposées sphériques. On voit aussi apparaître, d'une manière intuitive, la notion de finesse de division.

Seule une étude statistique, longue et complète, permet de préciser cette notion en indiquant comment sont réparties les micelles dans les différents domaines de diamètres. Une telle étude conduit à l'établissement d'une courbe caractéristique de cette répartition appelée *courbe de dispersion*.

On dit que l'émulsion est *uniforme* quand toutes les micelles sont égales ou ont le même diamètre. Une telle émulsion est réalisable à partir d'une émulsion non uniforme, traitée par la centrifugation fractionnée. C'est par cette méthode que Jean Perrin, en traitant un kilogramme d'émulsion de gomme gutte, réussit à obtenir quelques décigrammes de micelles uniformes au bout de plusieurs mois d'efforts (1).

La notion de finesse est susceptible de plusieurs définitions, ce qui rend malaisée la compréhension de certains mémoires qui s'y rapportent.

Elle peut se définir par exemple par le *nombre* de micelles obtenues avec l'unité de volume de phase dispersée. Dans cette définition, la répartition statistique des micelles dans les différents domaines de diamètres est complètement arbitraire. Les grosses micelles y jouent le même rôle que les petites.

On peut caractériser également la finesse par la surface totale des micelles obtenues en partant de l'unité de volume de phase dispersée puis considérer une émulsion uniforme ayant même nombre et même surface totale de micelles. Le diamètre uniforme ou diamètre capillaire moyen peut caractériser la finesse. Dans ce cas, le volume total des micelles uniformes considérées n'est plus égal à l'unité.

Mais la finesse de division peut aussi être définie par le diamètre volumétrique moyen des micelles, à savoir le diamètre des micelles d'une émulsion uniforme formée par un même nombre de micelles avec l'unité de volume. Les surfaces totales ne sont alors plus les mêmes.

Le diamètre moyen qui tiendrait compte du volume global et de la surface globale serait le rapport de ces deux grandeurs et pourrait être appelé diamètre moyen compensé. L'émulsion uniforme constituée par des micelles de ce diamètre avec l'unité de

(1) J. PERRIN, *Les atomes*.

volume de phase dispersée comprendrait un nombre de micelles différent de celui de l'émulsion envisagée.

Enfin, la moyenne arithmétique des diamètres des micelles qui est la définition naturelle du diamètre moyen pourrait également être prise en considération pour définir la finesse.

Le nombre, la surface, le volume des micelles d'une émulsion sont ainsi autant de facteurs susceptibles d'intervenir séparément ou combinés pour définir le diamètre moyen de cette émulsion, c'est-à-dire, en définitive, sa finesse.

Devant un tel nombre de définitions, il importe de faire un choix, ce qui est bien difficile. Ceci explique pourquoi tant d'auteurs parlent du diamètre moyen sans le définir, préférant en laisser l'initiative au lecteur embarrassé.

La plupart des laboratoires routiers qui utilisent la notion de finesse de division ont choisi le diamètre volumétrique moyen comme critère de cette finesse ; ils effectuent leurs mesures au moyen de microscopes et de cellules de comptage du type Thoma ou Bürker et regardent comme clos le cycle de leurs recherches en ce domaine.

Malgré l'autorité qui s'attache à de tels travaux, ce choix nous paraît néanmoins arbitraire et entraîne, de notre part, de très respectueuses et prudentes réserves.

Le choix pourrait, en effet, tenir compte de facteurs intervenant dans la mesure directe de la finesse d'une émulsion avec l'opacimètre par exemple. On sait que l'examen avec cet instrument est basé sur le fait qu'un flux lumineux, incident d'une certaine intensité, traverse un milieu homogène d'épaisseur connue en perdant une partie de son intensité. On dit que ce milieu présente une certaine opacité. Cette opacité se définit en fonction du flux perdu et sa mesure s'effectue industriellement à l'aide du colorimètre Dubosq en opérant en lumière monochromatique.

Dans la mesure de l'opacité, c'est bien la surface des micelles qui intervient comme variable indépendante et non leur volume. Les calculs théoriques du coefficient d'absorption se font pour une émulsion uniforme et deviennent impossibles pour une émulsion quelconque.

Pour une émulsion uniforme, l'opacité est proportionnelle à la concentration et en raison inverse du rayon des globules.

Les expériences dues à Oberbeck, Czermak et Hatschek ⁽¹⁾ montrent, en outre, qu'un jet liquide cylindrique débouchant dans un autre liquide ambiant immobile, se transforme sous l'action du frottement latéral en une surface qui s'enroule en formant une volute de révolution dont la section droite est une double spirale. L'énergie mise en jeu agit bien ainsi en augmentant l'aire de l'intersurface à la manière d'un rabot cylindrique animé d'un mouvement de translation. Dans l'éjecteur-tourbillon, le « rabot cylindrique » serait animé d'un mouvement hélicoïdal ; dans ce cas, les copeaux en volutes se résolvent en de fines sphérules ou micelles qui constituent alors des surfaces d'équilibre stable.

Cette hypothèse morphogénique permet seule d'expliquer la structure micellaire des émulsions doubles ou multiples. Les actions de surface sont ainsi bien prépondérantes dans la formation des émulsions et nous avons admis, en raisonnant par analogie avec d'autres lois physiques, que l'énergie dépensée lors de l'opération de mélange servait à augmenter l'aire de l'intersurface.

C'est en considération de ce qui précède que notre choix du diamètre capillaire comme diamètre moyen a toute notre préférence actuelle. On nous opposera que comparaison n'est pas raison et que le choix du diamètre capillaire comme mesure de la finesse d'une émulsion ne repose sur aucune base certaine. Nous répondrons que le choix du diamètre moyen aréolaire est moins arbitraire que celui du diamètre volumétrique moyen, basé seulement sur la facilité de sa mesure d'ailleurs bien relative.

Nous croyons que la cinématographie de l'opération de mélange dans le cylindre spiral à objectif photographique (fig. 2), ou mieux encore la photographie ultra-rapide à l'aide d'étincelles de décharge de condensateur système Stroborama Seguin donnerait probablement d'utiles arguments pour l'échafaudage d'une conclusion moins provisoire.

En fait, la finesse d'une émulsion n'a d'ailleurs d'importance que pour sa stabilité physique et physico-chimique. Cette stabilité n'est utile que pour le stockage ou la conservation des émulsions. Elle dépend plus de la nature des constituants, notamment de

⁽¹⁾ BOUASSE, *Tourbillons. Forces acoustiques. Circulations diverses*, t. I, p. 276-278.

l'émulsifiant et du stabilisant (ci-après, ch. V) que de la manière dont est fait le mélange. C'est ainsi qu'on cherche à réaliser à grands frais des émulsions fines et uniformes de goudron et de bitume pour les routes.

Stabilité et uniformité des émulsions routières perdent leur prépondérance et une partie de leur utilité quand leur préparation et leur application sont simultanées. On démontre d'ailleurs facilement qu'une émulsion directe d'hydrocarbure à 75 % ne saurait être uniforme (problème de la pile de boulets). Ceci prouve bien qu'il convient dans certains cas de rechercher une certaine hétérogénéité dans la granulométrie micellaire.

CALCUL DES CONCENTRATIONS. — ABAQUES

Le problème est le suivant :

Connaissant la section s du gicleur, la section S du col de la tuyère, les hauteurs h_1 et h_2 des surfaces libres des liquides primaire et secondaire avec les densités ρ_1 et ρ_2 de ces constituants, calculer les concentrations de ces constituants dans le mélange final. On néglige les viscosités en les supposant identiques et très faibles.

Soient q_1 le débit primaire, q_2 le débit secondaire, Q le débit du mélange : $Q = q_1 + q_2$.

Quand la masse Q s'écoule au col de la tuyère, tout se passe, au point de vue de l'énergie, comme si l'on prenait une masse q_1 à la cote h_1 et une masse q_2 à la cote h_2 pour les transporter jusqu'à la section étranglée de la tuyère. Le travail ainsi accompli s'évalue par :

$$g (q_1 \cdot h_1 + q_2 \cdot h_2).$$

Soit U la vitesse du mélange au col de la tuyère. Si l'on admet que l'énergie se conserve, on peut écrire :

$$g (q_1 \cdot h_1 + q_2 \cdot h_2) = \frac{1}{2} (q_1 + q_2) U^2 \quad (1)$$

qui peut s'écrire :

$$2g \left(\frac{q_1}{q_1 + q_2} h_1 + \frac{q_2}{q_1 + q_2} h_2 \right) = U^2$$

La quantité représentant la concentration primaire dans le mélange n'est autre que $c_1 = \frac{q_1}{q_1 + q_2}$. La concentration est elle-

même $c_2 = \frac{q_2}{q_1 + q_2}$. On voit immédiatement que l'on a bien $c_1 + c_2 = 1$.

L'équation (1) peut s'écrire :

$$2g (c_1 h_1 + (1 - c_1) h_2) = U^2. \quad (2)$$

Soit ρ la densité du mélange.

$$Q = q_1 + q_2 = U.S. = \frac{q_1}{c_1} = \frac{s}{c_1} \times v_1$$

v_1 étant la vitesse de sortie du liquide primaire dans le liquide secondaire. On sait que $v_1^2 = 2g (h_1 - h_2)$.

On peut écrire également que le volume du mélange est égal à la somme des volumes des constituants, c'est-à-dire :

$$\frac{q_1}{\rho_1} + \frac{q_2}{\rho_2} = \frac{Q}{\rho}$$

ou

$$\frac{c_1}{\rho_1} + \frac{1 - c_1}{\rho_2} = \frac{1}{\rho}$$

D'où :

$$\rho = \frac{\rho_1 \rho_2}{c_1 (\rho_2 - \rho_1) + \rho_1}$$

$$U^2 S^2 \rho^2 = \frac{s^2}{c_1^2} \times v_1^2 = \frac{s^2}{c_1^2} \times 2g (h_1 - h_2)$$

d'où

$$U^2 = \frac{s^2}{S^2} \times \frac{1}{c_1^2} \times 2g (h_1 - h_2) \frac{c_1 (\rho_2 - \rho_1) + \rho_1}{\rho_1 \rho_2}$$

En transposant dans l'équation (2) :

$$2gc_1 (h_1 - h_2) + h_2 = \frac{s^2}{S^2} \times 2g (h_1 - h_2) \frac{[c_1 (\rho_2 - \rho_1) + \rho_1]^2}{\rho_1^2 \rho_2^2}$$

Où finalement :

$$c_1 + \frac{h_2}{h_1 - h_2} = \frac{s^2}{S^2} \times \frac{1}{c_1^2} \frac{[c_1 (\rho_2 - \rho_1) + \rho_1]^2}{\rho_1^2 \rho_2^2}$$

Enfin posons :

$$\lambda = \frac{h_2}{h_1 - h_2}$$

$$\lambda = \frac{s^2}{S^2} + \frac{1}{c_1^2} \frac{[c_1 (\rho_2^2 - \rho_1^2) + \rho_1]}{\rho_1^2 \rho_2^2} - c_1$$

Cette relation permet ainsi de calculer la concentration primaire en fonction des sections, densités et pressions données.

Si l'on suppose les densités primaire et secondaire égales entre elles, l'équation se simplifie et s'écrit :

$$\lambda = \left[\frac{s^2}{S^2} \times \frac{1}{\rho^2} - c_1^3 \right] \frac{1}{c_1^2}$$

Si l'on suppose enfin que les densités sont égales à un, l'équation devient :

$$\lambda = \frac{\frac{s^2}{S^2} - c_1^3}{c_1^2}$$

C'est cette équation qui sera utilisée ultérieurement pour résoudre les différents problèmes qui peuvent se présenter. Pratiquement, ces problèmes se ramènent à deux :

1° Étant donnés les diamètres φ et Φ du gicleur et de la tuyère, les pressions h_1 et h_2 primaire et secondaire, déterminer la concentration primaire c_1 .

2° On veut obtenir un mélange de concentration primaire c_1 . On demande de déterminer les pressions et le diamètre φ du gicleur, pour un diamètre Φ de la tuyère.

$$\text{Résolution de l'équation } \lambda = \frac{\frac{s^2}{S^2} - c_1^3}{c_1^2} \quad \text{Abaques.}$$

L'équation caractéristique de la concentration est une équation du troisième degré qui présente certaines difficultés dans sa résolution. Ces difficultés sont tournées pratiquement par l'artifice suivant. Nous sommes partis d'un orifice de tuyère « normale » de 6 millimètres de diamètre. Nous avons tracé les courbes $\lambda = f(c_1)$ pour 7 valeurs de φ correspondant respectivement à 30, 35, 40, 45, 50, 55 et 60 dixièmes de millimètres (fig. 6). Partant ensuite de l'ordonnée $c_1 = 1$ comme axe des ordonnées, nous avons tracé la famille des courbes $\lambda = \frac{P_2}{P_1 - P_2}$ pour les pressions primaires

P_1 de 2, 3, 4, 5 et 6 kilos. La résolution graphique des deux problèmes ci-dessus est immédiate et ne présente alors plus aucune difficulté.

Exemple. On se propose de déterminer les caractéristiques de fonctionnement du mélangeur pour obtenir un mélange contenant 50 % de chacun des constituants.

Résolution graphique. La concentration primaire demandée de 50 % a pour abscisse $c_1 = 0,5$. L'ordonnée correspondante coupe les courbes relatives aux diamètres de gicleurs de 40, 45, 50 et 55 dixièmes. L'intersection avec la courbe du gicleur 40, par exemple, correspond elle-même à $\lambda = 0,30$ environ, cette valeur de λ permettant de fixer la pression secondaire P_2 si l'on se donne *a priori* la pression primaire P_1 . Pour $P_1 = 5$ kilos, par exemple, il faudra choisir $P_2 = 1$ kg, ce qui donne un écart $P_1 - P_2 = 4$ kgs.

Pour un gicleur de 55, on obtient, pour la même concentration primaire $c_1 = 0,50$, une valeur de $P_1 - P_2 = 2$ kg. 1.

Dans ce cas, à la pression primaire de 5 kilos correspond une pression secondaire de 3 kg. 5 environ, soit un écart des pressions $P_1 - P_2 = 1$ kg. 5.

On voit ainsi que pour obtenir une concentration déterminée de constituant primaire, on peut prendre plusieurs gicleurs. On voit également que pour une même pression primaire, l'écart des pressions augmente quand le diamètre du gicleur diminue.

Comme la finesse de division croît avec l'énergie dépensée dans le mélangeur, nous pouvons prévoir la règle suivante :

Le paramètre λ le diamètre ϕ du gicleur et le diamètre capillaire moyen varient dans le même sens.

En pratique, on choisira les caractéristiques de fonctionnement de l'éjecteur-tourbillon selon des considérations chimiques sur la nature des constituants et physiques sur le mélange à obtenir. Les indéterminations ne sont donc qu'apparentes et se lèvent dans les cas particuliers du laboratoire.

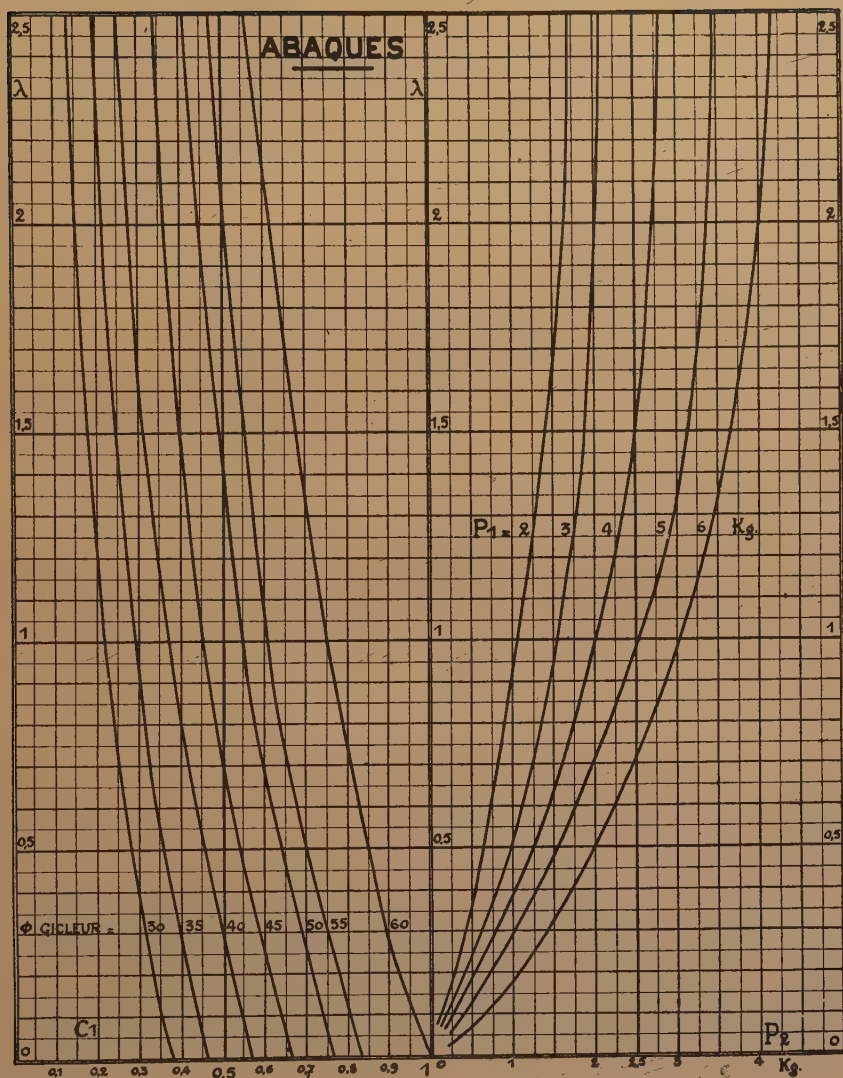


Fig. 6.

Ces abaques permettent de déterminer les pressions primaire P_1 et secondaire P_2 , le diamètre ϕ du gicleur nécessaires pour obtenir une concentration demandée.

CHAPITRE V

Résultats expérimentaux Les émulsifs ou agents émulsifiants

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Un très grand nombre d'essais de laboratoire ont été entrepris systématiquement avec le mélangeur à Puits-Tourbillon. De l'ensemble de ces essais, il résulte que les buts particuliers suivants ont été atteints dans les très nombreux cas :

1° mélanger intimement deux corps non miscibles eau et huile ; suspension minérale aqueuse et huile ; etc.

2° effectuer le mélange dans certaines proportions ;

3° rester maître de la finesse de division des corps dispersés de phase liquide ;

4° faire varier rapidement les concentrations des constituants dans les deux sens ;

5° obtenir à volonté les deux systèmes dispersés : *directe* ou huile dans l'eau (H — E) ou Oil in Water (O — W) ; *inverse* ou eau dans l'huile (E — H) ou Water in Oil (W — O).

Les applications industrielles les plus importantes étant réservées à la route, c'est dans le domaine intentionnellement limité des liants routiers qu'ont eu lieu les principales recherches. Il convient de noter que nous avons choisi comme constituants de phase huileuse les *goudrons*, les *bitumes* et, d'une manière générale, les liants hydrocarbonés. Comme constituants de phase aqueuse : l'eau avec divers émulsifs et les suspensions de *fillers* dans l'eau.

Avant d'analyser quelques-uns des résultats obtenus, il convient de préciser les conditions générales dans lesquelles les essais ont été conduits en laboratoire.

Considérations sur les goudrons et les bitumes

La bibliographie sur les goudrons et les bitumes tiendrait à peine dans un gros volume ; aussi renvoyons-nous le lecteur à cet océan de connaissances et de science pour y puiser tous renseignements utiles sur les qualités techniques, les propriétés de ces liants dont il pourrait avoir besoin. Nous nous bornerons à dire que, pour que ces hydrocarbures puissent passer à l'éjecteur-tourbillon, il est nécessaire que leur viscosité soit suffisamment basse pour les faire entrer en turbulence. On obtient habituellement une viscosité convenable en élevant la température d'une manière suffisante. La tension superficielle de ces liants suit alors une diminution correspondante. Il va sans dire que le passage d'un liant à ce mélangeur ne modifie en rien sa nature propre. Le poids spécifique, la ductilité, la solubilité dans certains liquides organiques, le point de ramollissement, sont des propriétés particulières à chaque nature de liant. Il importe donc de bien préciser la nature de ces liants et de lui attacher une définition physique et chimique aussi exacte que possible. Généralement, on se contentera d'indiquer l'origine de l'hydrocarbure ou son appellation commerciale, celle-ci permettant, en principe, de le définir d'une manière suffisamment nette. Il est certain qu'un bitume dur ne donnera pas la même émulsion qu'un bitume mou et on peut en dire autant des goudrons. Les goudrons et les bitumes pourront être mélangés en quantités *quelconques* au moyen de l'éjecteur-tourbillon et donner soit des goudrons bitumes, soit des bitumes goudrons. On pourra également fluxer les bitumes au moyen d'huiles diverses, anthracéniques ou autres, et préparer aussi les liants dits fluxés.

Les fillers et leurs suspensions

Nous appellerons filler une poudre solide quelconque très finement divisée. La finesse d'un filler se définit aisément par sa courbe granulométrique. Le charbon pulvérulent, le calcaire, la brique, la silice, les ciments, le minerai de fer, finement divisés, la

sciure de pierre, constituent des fillers. On obtient ces fillers en broyant de gros éléments de matières premières, c'est-à-dire en augmentant considérablement leur surface par la dépense de beaucoup d'énergie. Les fillers ainsi obtenus en fines moutures sont des corps secs susceptibles d'être ensachés.

Mais on peut trouver un grand nombre de fillers sous la forme de sédiments naturels ou de résidus de diverses fabrications ; dans ces cas, les fillers sont souvent humides et se présentent sous des aspects les plus variés. Citons parmi les fillers naturels : l'argile, le kaolin, la bentonite, le kieselguhr, les diatomites, etc. Comme fillers résiduels de fabrications : les micro-cristaux de calcite provenant de la fabrication du carbonate de soude, de la soude. Les résidus de défécation de sucreries sont également constitués par les micro-cristaux de calcite auxquels s'ajoutent des matières organiques plus ou moins colloïdales. Citons également les schlamms provenant du lavage des charbons, les résidus de lavage des ocre, les boues rouges ou résidu final de la fabrication de l'alumine par voie sodique. Cette liste n'est, bien entendu, que tout à fait indicative et il existe des multitudes de fillers particuliers artificiels ou naturels. Tous ces fillers peuvent être mis en suspension dans l'eau. On obtient ainsi un liquide dont l'étude sommaire ne manque ni d'intérêt théorique ni d'intérêt pratique.

Lorsqu'on mouille un filler sec quelconque, on constate une légère élévation de la température ; ce phénomène est connu sous le nom de phénomène de Pouillet. Si l'on imbibe un filler placé dans un vase poreux et auquel on a adapté un tube manométrique, on constate que la pression dans le tube peut s'élever à plusieurs kilos. Cette pression dépend de la nature du filler utilisé.

Quand on délaye un certain poids de filler dans le même poids d'eau, on obtient une suspension dont la viscosité varie en raison inverse de la densité. Une telle suspension de charbon est beaucoup plus visqueuse qu'une suspension de calcite à même concentration pondérale. Si l'on abandonne à elles-mêmes ces suspensions dans un récipient, on remarque que les grains les plus gros se déposent les premiers, c'est le phénomène de plombage. Au sein de la suspension il se produit un classement des grains par dimensions décroissantes. Le phénomène est utilisé pour obtenir des poudres fines et uniformes comme l'émeri à polir le verre.

Une suspension ne reste homogène qu'autant que l'on y établit une circulation artificielle des grains : par brassage ou par insufflation d'un gaz, par exemple.

L'étude du mouvement des particules de filler au sein d'une suspension est extrêmement complexe : une douzaine de variables indépendantes interviennent dans ce mouvement. L'étude théorique de la viscosité de telles suspensions présente des difficultés jusqu'ici non surmontées. Elle a été abordée par Einstein, Arrhénius, Smoluchowski pour des particules sphériques sous faible concentration. L'étude expérimentale de cette viscosité peut être abordée beaucoup plus simplement et l'on peut assurer que pour une suspension d'un filler donné, la viscosité croît avec la concentration et décroît avec la température.

La densité d'un filler mis en suspension dans l'eau étant connue, on connaîtra la concentration en filler par mesure de la densité de la suspension. Indiquons, par exemple, qu'un filler calcaire mis en suspension dans l'eau à raison de 50 % d'eau et 50 % de filler — en poids — donne une suspension dont la densité est d'environ 1.20. La mesure des densités des suspensions à l'aréomètre donne des résultats incertains. Notons comme singularité que le filler S.B.C. (Schistes bitumineux cuits) mis en suspension dans l'eau (50 %) donne un liquide dont la surface de séparation n'est ni plane ni horizontale. Signalons également que certaines roches acides mises en contact avec l'eau ne modifient en rien ses propriétés ; mais si l'on augmente la surface des contacts en délayant le filler obtenu avec cette même roche acide, on constate que le potentiel hydrogène ou pH de la liqueur baisse d'une façon très sensible, ce qui prouverait que la solubilité d'un solide augmente avec sa finesse. L'argile peut être considérée comme un filler. Ses suspensions aqueuses sont intéressantes à divers point de vue, surtout si elle est à l'état pur. Les kaolins sont également à retenir pour certaines applications. Les suspensions argileuses peuvent servir de support à d'autres fillers plus lourds telle la baryte et constituer des médiums liquides à haute densité. Ces médiums trouvent leur application dans la préparation de certains minerais. Ces suspensions sont également de bons auxiliaires pour la mise en suspension de poudres d'asphalte naturelles provenant du bassin du Gard, de Sicile, des Abruzzes ou d'autres gisements.

Les suspensions huileuses des fillers sont de la plus haute importance au point de vue industriel. De telles suspensions constituent, en effet, les peintures au sujet desquelles de nombreuses études ont été faites. Les fillers *secs*, mis en suspension dans des goudrons donnent des liants aux propriétés avantageuses à de nombreux points de vue, mais dont les difficultés de préparation, de manipulation, de transport et de répandage ont entravé le développement généralisé. Les bitumes de la Trinité sont des bitumes naturellement fillérisés par des frustules de diatomées, et l'on sait combien ils sont appréciés dans les applications de la voirie.

Emulsions filler

Les suspensions aqueuses de fillers peuvent être utilisées comme constituants de divers mélanges obtenus avec l'éjecteur-tourbillon. Le passage à l'éjecteur-tourbillon implique que la suspension est également suffisamment fluide pour entrer en turbulence. Cette condition est obtenue par limitation de la concentration pondérale du filler dans l'eau, complétée au besoin par une élévation convenable de la température de la suspension. Pour obtenir facilement le mélange, il convient également que la concentration en filler ne descende pas au-dessous d'une certaine limite qui varie avec chaque nature de filler. Mais il n'est généralement pas indispensable d'ajouter un agent émulsif ou mouillant à la suspension pour obtenir le mélange.

Si l'on passe à l'éjecteur-tourbillon une suspension ainsi définie, avec une phase huileuse, le raisonnement et l'expérience montrent que l'on obtient comme produit final l'un ou l'autre des systèmes suivants :

a) un mélange dans lequel la phase huileuse — goudron, bitume, huile — est dispersée dans l'eau sous forme de micelles juxtaposées aux grains de fillers et coexistant avec ceux-ci. Le continuum, dans ce système, est représenté par l'eau.

b) un mélange dans lequel l'eau est dispersée dans l'hydrocarbure sous la forme de fines sphérules contenant des grains de fillers. La phase aqueuse est ici discontinue. L'hydrocarbure forme alors le continuum.

Nous appellerons émulsions-filler *directes* les mélanges dans les-

quels l'eau est le continuum. Une émulsion directe de goudron filler sera constituée par une suspension de micelles de goudron dans une suspension aqueuse de filler. Une émulsion *inverse* de goudron-filler sera formée par une dispersion de sphérules d'eau contenant des grains de fillers dans un continuum de goudron.

Ainsi que nous l'avons vu, il existe une incertitude dans la formation de l'un ou l'autre de ces deux systèmes et l'expérience montre que l'éjecteur-tourbillon donne indifféremment les deux systèmes.

Lès émulsions directes s'étendent indéfiniment dans l'eau tandis que les émulsions inverses ne s'y diluent point. Les deux systèmes possèdent les propriétés communes suivantes :

1° Ces deux systèmes sont en général extrêmement stables. Leur conservation en vase clos peut s'étendre sur plusieurs années sans modification apparente du produit.

2° Lorsque l'eau est éliminée des deux systèmes, par n'importe quel moyen, il subsiste une suspension d'hydrocarbure-filler.

3° L'eau une fois éliminée, le mélange hydrocarbure-filler n'est plus miscible à l'eau. Le phénomène est irréversible.

Les liants fillers ainsi obtenus ont des propriétés « routières » qui dépendent à la fois de la nature du liant de constitution, de la nature du filler, de sa granulométrie et de sa concentration dans le liant.

Ces propriétés sont connues et elles ont fait l'objet de nombreux mémoires.

LES ÉMULSIFS OU AGENTS ÉMULSIFIANTS

De nombreuses expériences montrent que la stabilité d'une émulsion n'est obtenue qu'en ajoutant certains corps chimiques à l'un des constituants. Si l'on passe, en effet, de l'eau pure et un hydrocarbure à l'éjecteur-tourbillon, l'énergie dépensée est bien utilisée à augmenter l'aire des surfaces de contact des deux phases. Toutefois une énergie potentielle correspondante devient aussitôt disponible sur la surface ainsi formée. Cette énergie se libère en rendant l'aire de la surface minimum. Le mélange amorcé ne subsiste pas. Les deux phases aqueuse et huileuse se trouvent finalement

à leur état initial. C'est ce qui se produit lorsqu'on mélange à l'eau pure un bitume ou un goudron portés à une température quelconque.

Si, ajoutant à l'eau une proportion d'environ 2 % de résinate de soude, ce qui en abaisse sensiblement la tension superficielle, on répète l'expérience précédente avec un bitume d'une part puis un goudron d'autre part, on constate que :

- a) avec le bitume on obtient une émulsion directe stable (H — F) ;
- b) avec le goudron, le mélange amorcé ne subsiste pas.

Nous dirons que le résinate de soude est un *émulsif* ou émulgateur du bitume considéré, mais que cet émulsif ne convient pas au goudron considéré.

Ces expériences prouvent, en outre, que si l'abaissement de la tension interfaciale constitue une condition nécessaire à la formation de l'émulsion stable, cette condition n'est pas suffisante. Parmi les agents émulsifs employés industriellement et convenant généralement aux bitumes, on peut citer les savons de soude et de potasse, notamment les oléates — le savon noir — les sulfonates, la gélatine, la caséine lactique neutralisée par la soude, employés à faible concentration dans la phase aqueuse. Le choix de l'émulsif n'est pas indifférent, car l'on a remarqué qu'une émulsion faite avec un certain émulsif convient mieux pour une application donnée que pour une autre application.

Les émulsifs du goudron sont des corps complexes. Nous avons obtenu avec l'éjecteur-tourbillon des émulsions de goudron en employant des mélanges de résinate et de caséinate de soude. La densité du goudron étant plus grande que celle du bitume, les émulsions de goudron plombent plus facilement.

Les émulsifs sont, en général, des corps organiques à poids moléculaire élevé. Selon les théories les plus récentes, ils se répartiraient à la surface des micelles en s'orientant et en formant une couche protectrice. Toutefois, ces théories n'ont pas fait l'objet de vérifications directes, bien qu'elles cadrent avec un certain nombre de faits expérimentaux.

Il convient également de remarquer que l'enveloppe protectrice ne paraît pas devoir se former à la surface des micelles d'une émulsion dont la phase continue est une suspension aqueuse d'un filler quelconque. On objecte alors qu'on se trouve en présence d'une pseudo-émulsion.

CHAPITRE VI

Appareillage et essais de laboratoire

Cet appareillage est formé par le jumelage de deux réservoirs d'une trentaine de litres de capacité utile (fig. 7). Ces réservoirs sont construits pour résister à la pression et sont au besoin calorifugés. Ils sont munis d'un piétement de remplissage avec un dispositif de fermeture rapide. Les réservoirs 1 et 2 sont raccordés à des détendeurs de gaz D_1 et D_2 permettant d'obtenir des pressions P_1 et P_2 dans les réservoirs au moyen d'air comprimé, par exemple. Les manomètres M_1 et M_2 indiquent ces pressions détendues. Des tubes borgnes, plongeant dans les réservoirs, permettent de mesurer les températures au moyen de thermomètres à mercure T_1 et T_2 . Le mélangeur proprement dit est raccordé aux deux réservoirs par des tubulures et raccords Union U_1 et U_2 agencés de telle sorte que le primaire et le secondaire soient facilement interchangeables sans qu'il soit besoin de transvaser les liquides d'un réservoir à l'autre. Les vannes V_1 et V_2 à fermeture et ouverture rapides permettent d'envoyer les constituants au mélangeur. Les robinets R_1 et R_2 , disposés en aval des vannes, permettent de nettoyer commodément le mélangeur à l'air comprimé dérivé des réservoirs. L'ensemble est complété, si besoin, par des filtres placés dans le piétement d'entrée.

La photographie n° 3 montre un de ces jumelages.

Les essais au laboratoire

Ce sont les considérations théoriques sur les calculs des concentrations qui seront le guide des essais. Les abaques étudiés précédem-

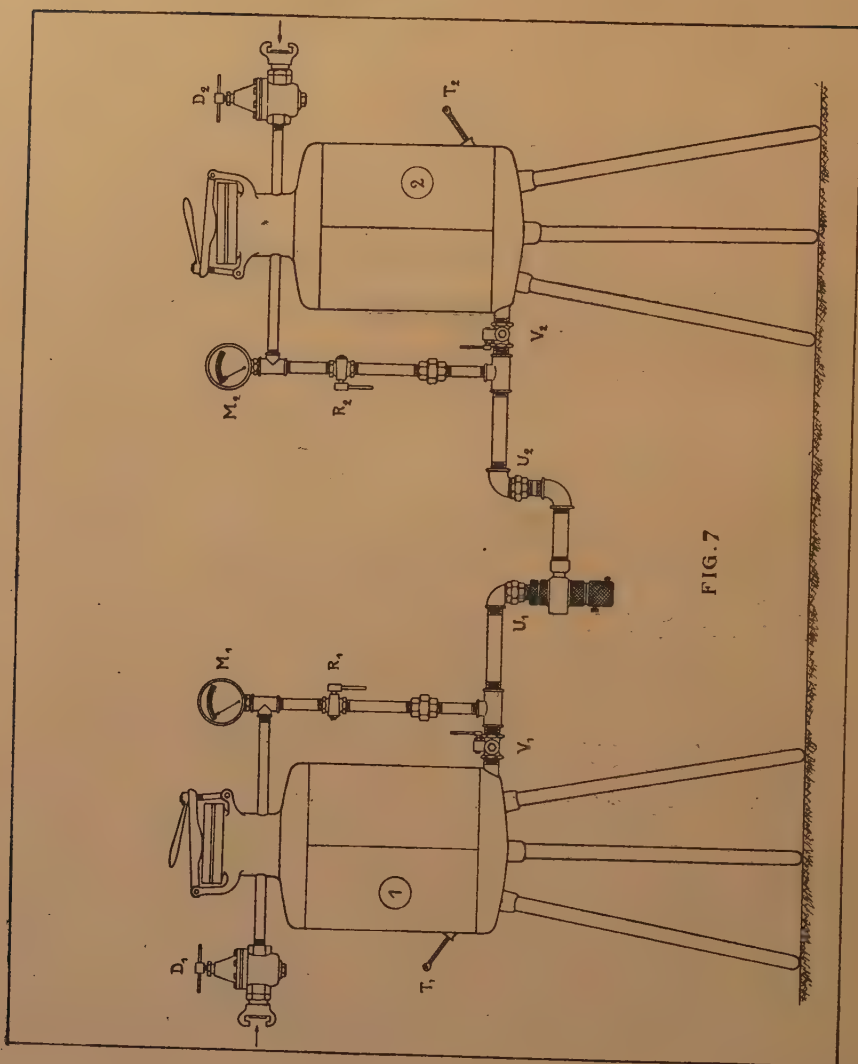


Fig. 7.

Vue schématique d'un jumelage de laboratoire avec appareils de mesures, détendeurs, robinetterie et éjecteur-tourbillon.

ment fixent les caractéristiques provisoires de l'opération que l'on se propose d'entreprendre. Les abaques donnent, en effet, le choix entre différentes solutions, selon les concentrations à obtenir. On partira d'un choix arbitraire, déterminant le diamètre du gicleur à employer et les pressions primaire et secondaire. On remplit les récipients avec les liquides à mélanger.

Pour effectuer le mélange, il suffit alors d'ouvrir les vannes V dans un certain ordre. Avant de recueillir un échantillon du mélange, il y a lieu d'attendre que le mouvement permanent soit établi dans l'éjecteur-tourbillon, ce qui est d'ailleurs très rapide. Avec une prise d'échantillon prématurée, on risque, en effet, de recueillir des parties non mélangées, ce qui fausse les premières observations. Lorsqu'on estime suffisant le volume de mélange recueilli, on arrête l'opération de la façon suivante : ouvrir d'abord les robinets R_1 et R_2 , fermer les vannes V. Les tuyauteries et l'éjecteur-tourbillon sont ainsi nettoyés à l'air comprimé.

Pour travailler méthodiquement, il est conseillé d'utiliser systématiquement une fiche d'essai par opération. Ces fiches permettent de corriger les caractéristiques de l'essai en vue de tel ou tel résultat désiré. A cet effet, nous avons établi un type de fiche qui nous a donné entière satisfaction et dont nous conseillons l'emploi.

Les fiches ci-après sont des exemples qui fixent les idées à ce sujet.

Remarques. Les abaques ne tiennent pas compte de la viscosité des constituants ; les calculs ont été faits en supposant que ces viscosités sont faibles et identiques. On en tiendra compte pratiquement en élevant la température des constituants d'une manière suffisante. Nous avons remarqué que pour les émulsions de bitume il est commode de retenir la règle empirique suivante :

La somme des températures primaire et secondaire se rapprochera le plus possible de 180°C .

Pour les goudrons, cette somme des températures pourra être abaissée à 160°C .

Observations des résultats Modification des caractéristiques

A. Si le mélange est trop faible, en constituant primaire, c'est que le débit primaire était insuffisant ou que le débit secondaire était trop fort.

Pour remédier à cet état de choses, on peut soit prendre un plus gros gicleur, soit augmenter la pression secondaire.

B. Si la concentration primaire est obtenue, mais si la finesse de dispersion est insuffisante, il y a lieu de dépenser plus d'énergie tout en maintenant constant le débit primaire. La correction se fera, dans ce cas, en diminuant le diamètre du gicleur et en augmentant la pression primaire.

Notons que les variations de pressions sont obtenues très commodément et rapidement par les détendeurs de gaz.

C. Si le système dispersé obtenu n'est pas celui qu'on recherche, utiliser l'un des quatre moyens indiqués en commençant par le moyen de préséance : changement de l'ordre d'ouverture des vannes. Essayer ensuite le moyen géométrique, ce qui est très simple par construction : le raccord union U_1 vient en U_2 et réciproquement.

Dans ce cas, il convient de nettoyer préalablement l'éjecteur et de régler les détendeurs. Essayer ensuite le moyen physique par élévation de la température. Finalement modifier l'agent émulsif.

Commentaires sur quelques essais

Fiche n° 1. Une entreprise nous avait demandé de préparer avec l'éjecteur-tourbillon une émulsion directe de bitume à 50 %, identique à celle obtenue dans son usine avec homogénéiseur. Elle mettait à notre disposition la même phase aqueuse (eau et résinate de soude à 3 %), le même bitume aux mêmes températures. La fiche n° 1 est l'aboutissement d'une série de trois essais au bout desquels l'émulsion de bitume à 50 % qui nous avait été demandée a été obtenue. Placées dans deux flacons identiques, les deux émulsions ne pouvaient être reconnues ni à l'œil exercé du contremaître ni au microscope. Le comportement dans le temps s'est révélé identique. Au bout de six mois, l'aspect des deux échantillons était absolument le même. Nous sommes parti des caractéristiques données par les abaques, à savoir gicleur de 40, pression primaire 5 kilos, pression secondaire 1 kilo. La phase aqueuse étant beaucoup trop abondante, nous avons exécuté un deuxième essai avec un gicleur de 35 et les mêmes pressions. Le troisième essai, dans lequel nous avons simplement porté la pression secondaire à 1 kil. 8 pour

enrichir encore en bitume, a donné la solution au problème qui nous avait été posé.

Fiche n° 2. Est un cas-type de fabrication d'émulsion inverse de goudron filler. Le produit obtenu est de très haute viscosité. Les concentrations indiquées correspondent au goudron d'une part et à la suspension d'autre part.

L'eau une fois éliminée par évaporation en couche mince, par synérèse ou de toute autre façon, il reste une dispersion très homogène de filler dans le goudron ; la grande régularité de répartition des grains de filler est facilement observable au microscope. Elle pourrait être l'objet d'utiles recherches par la photographie, à l'aide d'objectifs spéciaux apochromatiques et rayons infra-rouges.

Remarque. Rien ne s'oppose à utiliser des mélanges de fillers, et à combiner leurs propriétés particulières.

Fiche n° 3. Correspond à une émulsion directe de goudron-filler. Celle-ci s'étend dans l'eau en toutes proportions. L'étude microscopique du produit est particulièrement commode au polariseur à cause de la nature cristallographique des grains solides.

Fiche n° 1

Date : juin 1938.

ESSAI DE LABORATOIRE

CONDITIONS DE L'ESSAI

SPÉCIFICATIONS	PRIMAIRE	SECONDAIRE
Diamètre du gicleur	35 /10	
Pressions	5,00 kg	1,800 kg
Température	61° C	110° C
Ordre d'ouverture	1	2
RENSEIGNEMENTS SUR LES CONSTITUANTS		
Nature.....	Eau plus résinate de soude (3 %)	Bitume
Provenance		Raffinerie de Berre.
Analyse	=	
Densité	1	1
Viscosité	?	?
Observations		

RENSEIGNEMENTS SUR LE PRODUIT OBTENU

Température	85° C	Observations diverses
Nature	émulsion directe	L'émulsion ainsi obtenue a exactement les mêmes propriétés et possède les mêmes caractéristiques que celles de l'émulsion obtenue en usine avec un homogénéiseur.
Microscope	bonne dispersion	La stabilité au stockage à long terme - 6 mois - est identique pour les deux émulsions.
Viscosité	?	Rupture sur route identique.
Densité	1	
C ₁ =	50 %	
C ₂ =	50 %	
Adhésivité	=	

Recueilli dans la boîte n° 1.

Fiche n° 2

Date : juin 1938.

ESSAI DE LABORATOIRE

CONDITIONS DE L'ESSAI

SPÉCIFICATIONS	PRIMAIRE	SECONDAIRE
Diamètre du gicleur	50/10	
Pressions	3 kg	1,800 kg
Températures	110°	50°
Ordre d'ouverture	2	1
RENSEIGNEMENTS SUR LES CONSTITUANTS		
Nature.....	Goudron distillé	suspension aqueuse de filler S.B.C.
Provenance.....	type P et C	(Schistes bitumineux cuits)
Analyse	inconnue	Constituée à raison de 1 kg de filler 1 kg de filler par litre d'eau
Densité :	1,2	1,2 environ
Viscosité	Goudron très visqueux	
Observations		

RENSEIGNEMENTS SUR LE PRODUIT OBTENU

Température	63°	Observations diverses
Nature	Émulsion inverse (E-H)	L'émulsion inverse ainsi obtenue est d'une extrême stabilité au stockage.
Microscope	Très fine dispersion des sphérules d'eau contenant le filler.	Elle était intacte au bout d'un an, conservée à l'abri de l'air en vase clos.
Viscosité	1,2	L'émulsion soumise à une pression peu importante laisse exsuder une eau parfaitement limpide.
Densité	50 %	
C ₁ =	Approximativement	
C ₂ =	50 %	
Adhésicité	Bonne sur porphyre	

Recueilli dans la boîte n° 2.

Fiche n° 3

Date : juin 1938.

ESSAI DE LABORATOIRE

CONDITIONS DE L'ESSAI

SPÉCIFICATIONS	PRIMAIRE	SECONDAIRE
Diamètre du gicleur	40 / 10	
Pressions	3 kg	1,500 kg
Températures	70° C	120° C
Ordre d'ouverture	1	2
RENSEIGNEMENTS SUR LES CONSTITUANTS		
Nature.....	Suspension aqueuse de microcristaux de calcite, résidus de défécation de sucrerie avec traces de matières organiques.	Goudron reconstitué type P et C
Provenance.....		
Analyse		
Densité	1,2	
Viscosité	?	
Observations		

RENSEIGNEMENTS SUR LE PRODUIT OBTENU

Température	80° C.	
Nature	Émulsion directe	Observations diverses
Microscope	Bonne dispersion de micelles de goudron.	
Viscosité	?	
Densité	?	
C ₁ ==	50 %	
C ₂ ==	50 % environ	
Adhésivité		

Recueilli dans la boîte n° 3.

DEUXIÈME PARTIE

ÉTUDE ANALYTIQUE DE L'ÉPANDAGE DES LIANTS POUR ROUTES

« Que les mathématiques ont des inventions très subtiles et qui peuvent beaucoup servir tant à contenter les curieux qu'à faciliter tous les arts et diminuer le travail des hommes ».

DESCARTES.

CHAPITRE VII

Généralités Cas d'une courbe d'impact Cas d'une aire d'impact Les pulvérisateurs

GÉNÉRALITÉS

La valeur toujours croissante des liants routiers, la nécessité d'obtenir des résultats constants dans leur épandage sur les chaussées ont conduit les ingénieurs et les constructeurs à perfectionner les dispositifs destinés à répartir les hydrocarbures sur les chaussées d'une façon aussi rationnelle que possible.

De nombreux appareils, dénommés tantôt diffuseurs, tantôt pulvérisateurs, employés seuls ou en combinaison sur des rampes généralement transversales, ont eu et ont encore la prétention de donner un épandage uniforme.

Le but de la présente note est de rechercher dans quelles conditions un système épandeur donné peut justifier cette prétention.

Nous avons pensé, en effet, qu'une étude théorique de la question devait être tentée et que des résultats de cette étude on pourrait tirer certaines conclusions avantageuses. Nous serions heureux si ces réflexions pouvaient aider les ingénieurs dans le choix d'un système d'épandage destiné à atteindre certains buts précis.

Parmi ces buts, il est généralement admis que le plus utile et le plus recherché est l'uniformité de l'épandage. Nous allons tout d'abord définir cette uniformité.

Nous dirons qu'un épandage est uniforme quand le poids du liant reçu par une surface élémentaire d'aire aussi petite que l'on voudra, est constant quelle que soit la position de cette petite surface sur la zone d'épandage.

La *densité aréolaire* du liant au point considéré est la limite du rapport poids-surface quand la surface tend vers zéro.

Comme on suppose constant le poids spécifique du liant, au cours d'une opération, on dira également que l'épandage est uniforme quand le volume du liant reçu par une aire donnée infiniment petite est constant, ce qui revient encore à dire que l'épaisseur de la couche de liant est constante.

Position du problème

On considère un système émetteur de liants liquides pour lequel on définit l'ensemble des points d'impact des particules sur un plan horizontal. Cet ensemble de points d'impact est réparti soit sur une aire, soit le long d'une courbe. Le système émetteur se déplaçant à une certaine vitesse par rapport au plan horizontal engendre une bande matérielle de liant déposée sur ce plan ou bande d'épandage.

On demande les conditions auxquelles doit satisfaire le système émetteur et son déplacement pour que l'épandage soit uniforme.

CAS D'UNE COURBE D'IMPACT

Nous étudierons tout d'abord le cas où les points d'impact du liant sont répartis le long d'une courbe quelconque C (fig. 8). Pratiquement, il ne s'agira pas d'une courbe proprement dite, mais d'une aire infiniment mince.

Soit $y = f(x)$ l'équation de la courbe d'impact par rapport à deux axes de coordonnées Ox et Oy . Supposons la courbe limitée par les deux points M_0 et M_1 , c'est-à-dire que les points d'impact de liant seront seulement répartis sur la portion $M_0 M_1$ de la courbe d'impact C .

Considérons un arc élémentaire ds quelconque de cette courbe. Soit φ le flux instantané de liant reçu sur l'unité de longueur d'arc de la courbe C , au voisinage de ds .

Le flux instantané reçu le long de l'arc ds est donc φds .

Supposons que le déplacement du système émetteur entraîne pour la courbe d'impact C un mouvement de translation dans le sens Oy .

Le déplacement de l'arc d'impact ds va engendrer une bande élémentaire d'épandage de largeur dx . Pendant le temps très court dt , la courbe d'impact C est venue en C' , chaque point d'impact se déplaçant d'une longueur Δy . L'arc ds engendre un parallélogramme dont les côtés sont respectivement Δy et ds .

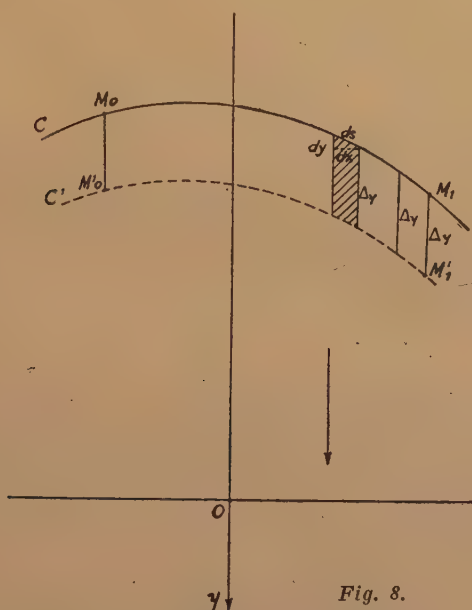


Fig. 8.

L'aire $d\sigma$ de ce petit parallélogramme est égale à $\Delta y \cdot dx$.

Cette aire aura reçu un poids de liant :

$$p = \varphi \cdot ds \cdot dt.$$

La densité du liant sur cette surface élémentaire ou densité aréolaire aura pour valeur :

$$\Delta = \frac{p}{d\sigma} = \varphi \frac{ds}{\Delta y} \frac{dt}{dx}$$

ou bien :

$$\Delta = \varphi \frac{ds}{dx} \cdot \frac{1}{\frac{\Delta y}{dt}} = \varphi \frac{ds}{dx} \cdot \frac{1}{V}$$

La répartition du liant sera uniforme si la densité aréolaire ainsi calculée est constante, quelle que soit la position de ds sur la courbe C.

Il apparaît ainsi très nettement que l'uniformité d'un épandage dépend :

- 1° du flux émis par le système émetteur ;
- 2° de la forme de la courbe d'impact ;
- 3° de la vitesse de translation du système émetteur.

Pour obtenir cette uniformité, il faut et il suffit que le produit des trois facteurs soit constant. On obtiendra donc l'uniformité en combinant judicieusement l'influence de ces facteurs.

Dans tout ce qui suivra, nous supposons que la vitesse de translation du système émetteur est constante, ce qui, pratiquement, est facilement obtenu. Pour cela, il suffit que la vitesse du véhicule portant le système émetteur soit uniforme.

Compte tenu de l'hypothèse précédente, l'épandage sera uniforme si le produit $\varphi \frac{ds}{dx}$ reste constant.

Ce résultat ne peut être acquis que de deux façons :

1° les deux facteurs sont constants ;

2° le flux φ est proportionnel à $\frac{dx}{ds}$.

Dans le premier cas, le flux étant constant, la quantité $\frac{ds}{dx}$ est constante, ce qui signifie que la courbe d'impact est une droite. C'est la solution la plus simple qui puisse s'imaginer. Nous reviendrons plus loin sur le deuxième cas.

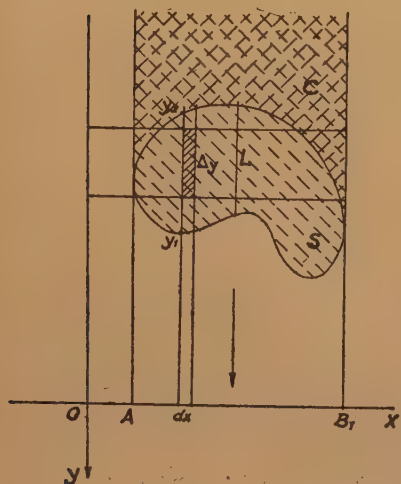
Si la courbe est quelconque, le cas se ramène facilement à celui d'une droite sur laquelle on projette l'arc et les flux.

CAS D'UNE AIRE D'IMPACT

Ce cas est le plus général rencontré dans les appareils diffuseurs.

Dans la plupart de ces appareils diffuseurs, les points d'impact sont répartis à l'intérieur d'une courbe fermée (fig., p. 69) sur une

aire S . L'aire S se déplace comme précédemment engendrant une bande d'épandage dont il s'agit de déterminer les conditions d'uniformité. Pour simplifier le problème, nous supposerons en premier



lieu que la vitesse de translation de l'aire d'impact S est constante et parallèle à Oy . Nous supposerons également le flux indépendant du temps, c'est-à-dire que le mouvement permanent est établi dans le système diffuseur. Soit Φ_y le flux instantané total traversant une bande mince, de largeur dx parallèle à Ox , et de longueur $L = y_2 - y_1$ parallèle à Oy . En réalité, tout se passe comme si le flux instantané était réparti sur l'élément de droite dx lui-même. Ce flux total Φ balayerait un petit rectangle fixe dx .

Δy pendant un temps $dt = \frac{\Delta y}{V}$.

Le poids de liant reçu pendant ce temps par le rectangle élémentaire $dx \Delta y$ est :

$$p = \Phi_y dt = \Phi_y \frac{\Delta y}{V}$$

La densité aréolaire devient :

$$\Delta = \frac{p}{dx \Delta y} = \frac{\Phi_y}{dx} \cdot \frac{1}{V}$$

ou, en posant :

$$\Phi_y = \frac{\Phi_y}{dx} \quad \Delta = \frac{\Phi_y}{V}$$

On se trouve ainsi ramené au cas d'une courbe d'impact rectiligne dans laquelle $ds = dx$, et pour lequel Φ_y représente le flux instantané de liant reçu par unité de longueur de la droite d'impact. Dans ce cas, on voit que le flux instantané total du liant le long d'une bande mince quelconque parallèle au mouvement doit être constant si l'on veut que la densité aréolaire soit constante. Ceci ne peut être obtenu, pour une aire d'impact quelconque, que grâce à une loi judicieuse de répartition du flux instantané à l'intérieur de l'aire d'impact S .

Si le flux instantané est uniforme, l'aire d'impact ne saurait plus être quelconque. Le flux total Φ_y devant être constant, comme ce flux est proportionnel à $y_2 - y_1 = L$, il faut que L soit constant quelle que soit la bande considérée.

Dans ce cas, l'aire S sera limitée par une courbe C qui aura la forme d'un parallélogramme curviligne dont les deux côtés parallèles au mouvement sont deux droites, les autres côtés étant deux courbes parallèles quelconques.

Remarque. Nous venons de voir que les deux modes d'épandage se ramènent en définitive à un seul : dans celui-ci, le flux instantané est réparti suivant une droite perpendiculaire au mouvement. La comparaison suivante permettra d'illustrer ce qui précède. Imaginons un boulier compteur dans lequel les boules ayant des dimensions quelconques seraient réparties au hasard sur les fils du boulier que l'on déplace lui-même dans le sens des fils. Chaque boule aurait un diamètre proportionnel à un flux instantané. On suppose le flux réparti sur la ligne des centres des boules. Dans ce cas, s'il y a seulement une boule sur chaque fil, on voit que l'on ne modifie pas l'épandage quelle que soit la position des boules : le flux ne varie pas et $\frac{ds}{dx}$ reste constant.

C'est le cas de la courbe d'impact.

Si les boules ont des diamètres quelconques et sont réparties au hasard, pour que la densité aréolaire soit constante, il faut que le total des volumes des boules situées sur chaque fil soit constant (cas d'une aire quelconque). Dans le cas où les boules sont identiques, pour que le flux soit constant, il faut que le nombre des boules sur chaque fil soit le même (cas du parallélogramme curviligne à flux constant).

Conséquences

Nous venons de voir dans ce qui précède que le flux reçu soit par la courbe d'impact, soit par l'aire d'impact joue un rôle essentiel dans l'épandage. Le rôle du flux est aussi important que la forme de la courbe ou de l'aire d'impact. Il est donc intéressant de voir comment on fait naître un flux matériel et comment on peut essayer de prévoir sa grandeur.

Définition du flux matériel

On considère un élément infiniment petit de surface $d\sigma$ au travers duquel s'écoulent les particules fluides. Soit V la vitesse linéaire du centre de gravité des particules à l'instant t . V_n la projection de la vitesse V sur la normale à la surface $d\sigma$. Le flux instantané $d\mathcal{F}$ au travers l'élément de surface est :

$$d\mathcal{F} = V_n d\sigma$$

C'est la quantité de matière qui traverse la surface $d\sigma$ à l'instant t . En réalité, le poids de matière correspondant est égal au flux multiplié par la densité de matière qui passe à l'instant t .

L'ensemble des éléments de surface $d\sigma$ forme un contour fermé Σ d'où s'échappe la matière. Le flux total qui traverse le contour Σ est :

$$\mathcal{F} = \iint_{\Sigma} V_n d\sigma$$

Si l'on veut bien se reporter au temps où l'on faisait connaissance avec ces notations, on se souviendra que cette intégrale de surface peut se transformer en une intégrale curviligne simple le long du contour fermé Σ qui va former l'orifice du système émetteur. On peut donc prévoir que, pour avoir des chances de connaître le flux, il faudra que le contour de l'orifice soit simple.

Pour obtenir un système correct, il faut :

1° choisir une surface-orifice qui donne soit une courbe d'impact correcte, soit une aire d'impact judicieuse ;

2° créer un champ de vitesses correct au travers de la surface-orifice.

Dans le cas des appareils connus sous le nom de diffuseurs, la surface-orifice est généralement tracée sur un cylindre. Le champ des vitesses est créé par un rotor à aubes ou à lumières. La vitesse initiale ou vitesse des particules à la sortie de l'orifice est la résultante des vitesses relatives et d'entraînement dues au rotor. Le champ des vitesses est ainsi obtenu par la vitesse angulaire d'un arbre, qui est difficile à régler avec précision. D'autre part, comme il s'agit souvent de surfaces-orifices importantes, il est plus difficile encore d'y prévoir en chaque point la vitesse des particules, notamment au voisinage des parois.

Pour ces raisons, la difficulté de prévision du flux est considérable.

Nous n'insisterons pas sur ces diffuseurs qui, pour donner l'uniformité recherchée, doivent être étudiés avec le plus grand soin et qui, faute de prévisions certaines, doivent être soumis préalablement à une expérimentation rigoureuse.

LES PULVÉRISATEURS

Nous rangerons ces appareils dans la catégorie de ceux qui donnent une courbe d'impact mince. Cette définition est arbitraire, car il existe des appareils portant ce nom et dont le flux est réparti sur une aire d'impact.

Pulvérisateur classique

C'est un pulvérisateur dont la courbe d'impact est théoriquement une circonférence, pratiquement une zone annulaire circulaire. La surface-orifice de ce système disperseur est un cercle. Le flux de liant qui en émane est réparti sur une surface conique. Pour des raisons de symétrie, le flux est constant sur la zone annulaire.

Calculons la densité aréolaire Δ produite par un tel système, à vitesse de translation constante.

$$\Delta = \frac{\varphi}{V} \frac{ds}{dx}$$

Notons, en passant, que la densité aréolaire varie en raison inverse de la vitesse de translation. En prenant comme variable, l'angle au centre α avec pour origine la *ppd* au mouvement, on trouve facilement :

$$\Delta = \varphi \cdot \frac{1}{V} \cdot \frac{1}{\sin \alpha}$$

Cette formule donnerait une densité infinie pour $\alpha = 0$. Pratiquement, il s'agit d'un maximum fini, la courbe d'impact étant, en réalité, une surface annulaire finie.

La densité aréolaire a donc un caractère périodique suivant la *ppd* au mouvement de translation. La période est égale au diamètre de la zone annulaire d'impact. Pratiquement, cette période est de

l'ordre de quelques décimètres. Comme on désire obtenir des bandes d'épandage de 2 à 3 mètres environ, on juxtapose les pulvérisateurs sur une rampe transversale en s'arrangeant pour que les zones d'impact des différents pulvérisateurs soient tangentes. On obtient ainsi une bande d'épandage dont la densité aréolaire transversale est sinusoïdale. Au bout d'un certain temps, on voit apparaître nettement sur la chaussée les maxima transversaux sous la forme de bandes longitudinales très marquées, donnant l'impression dite du « coup de peigne ».

Il est à signaler également que le flux s'obtient généralement en mettant le liant en charge avec un compresseur de gaz. La plupart du temps, les compresseurs utilisés sont insuffisants et donnent des pressions qui varient beaucoup du début à la fin de l'opération d'épandage. Il en résulte un champ des vitesses décroissantes et finalement une répartition longitudinale décroissante.

Pour modifier cette répartition transversale défectueuse, on a disposé les pulvérisateurs en quinconce sur une rampe transversale. On obtient ainsi une répartition nouvelle que l'on peut considérer comme la superposition de deux répartitions sinusoïdales. C'est encore une répartition périodique. Le coup de peigne est plus fin, mais il subsiste. Ceci prouve bien qu'il ne faut pas compter sur la fluidité du liant et la gravité pour obtenir automatiquement l'uniformité de sa répartition.

Remarque. Il est facile à voir, en examinant la formule donnant la densité aréolaire du liant que, lorsqu'une courbe d'impact est une courbe fermée, il existe toujours un maximum de densité aréolaire lorsque la tangente à la courbe est parallèle au mouvement.

En effet, $\frac{ds}{dx}$ représente l'inverse du cosinus de l'angle de la tangente à la courbe avec la *ppd* au mouvement. Comme la courbe est fermée, il existe forcément au moins deux points pour lesquels la tangente à la courbe est parallèle au mouvement.

CHAPITRE VIII

Recherche d'une solution rationnelle simple
Densité aréolaire variable — Surcharge longitudinale
Largeur des bandes d'épandage
Réalisation de l'émetteur à dosage uniforme
L'éjecteur-tourbillon à jet hyperbolique

RECHERCHE D'UNE SOLUTION RATIONNELLE SIMPLE

En dehors du cas simple envisagé où la courbe d'impact est une droite, nous avons vu que l'uniformité d'un épandage peut être acquise avec n'importe quelle courbe d'impact pourvu que le flux qu'elle reçoit par unité de longueur soit une fonction convenable de sa forme. Il est naturel de choisir une courbe simple et celle qui vient à l'esprit est la circonférence. Il faut donc trouver un émetteur de liant qui engendre une courbe d'impact circulaire et qui donne une couche de liant uniforme.

Considérons à nouveau une surface Σ limitée par un contour fermé D émettant un flux total instantané $\mathcal{F}$ de liant. Observons le liant qui sort par un élément infiniment petit d'aire $d\sigma$ suivant une direction $\mathcal{H}$ faisant avec la demi normale MN à la surface Σ un angle θ . Soit $\mathcal{H}$ la vitesse instantanée des particules de liant passant au travers de $d\sigma$. Le flux élémentaire de liant émis par $d\sigma$ a pour valeur :

$$d\mathcal{F} = \mathcal{H} \cos \theta d\sigma$$

Nous avons vu que le flux total instantané émis par le contour fermé D est défini par l'intégrale double :

$$\mathcal{F} = \iint_{\Sigma} \mathcal{H} \cos \theta d\sigma$$

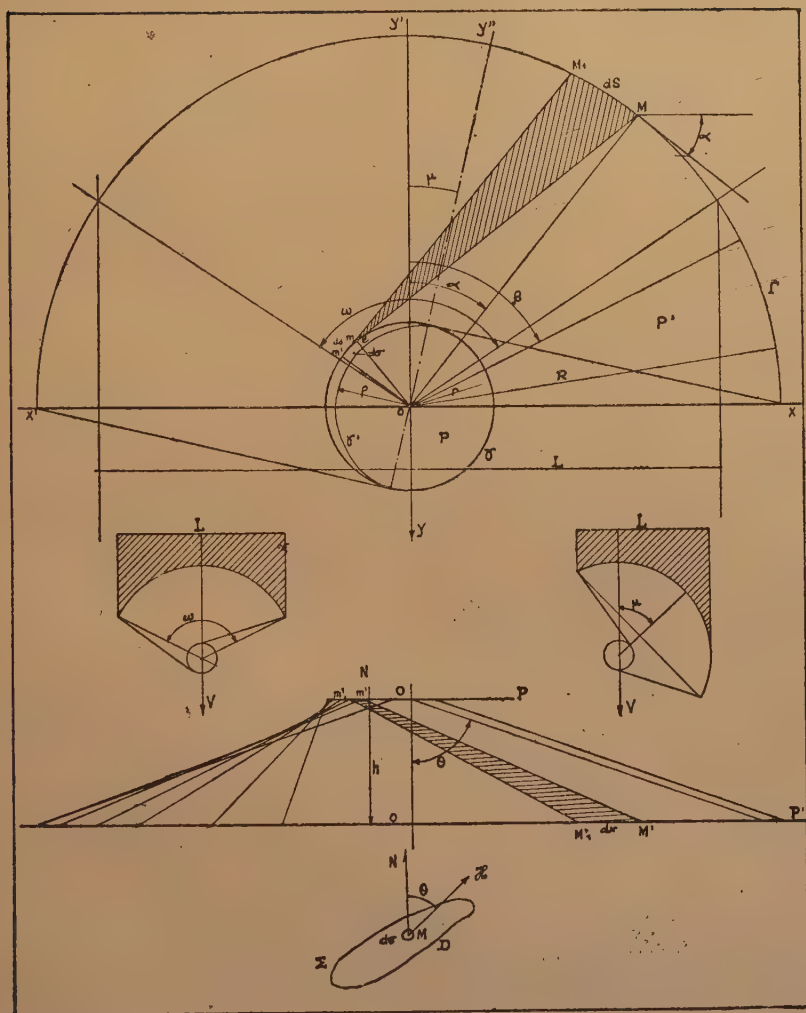


Fig. 9.

Épure du jet hyperbolique à courbe d'impact circulaire symétrique ou décalée pour la surcharge d'une rive.

Choisissons comme surface Σ une surface simple : un certain plan P (fig. 9). Arrangeons-nous pour avoir $\mathcal{H} = C^{\text{te}}$. Quelle que soit l'aire infiniment petite que nous avons choisie, nous aurons ainsi :

$$d\mathcal{F} = \mathcal{B}d\sigma \quad \text{avec } \mathcal{B} = \mathcal{H} \cos \theta$$

Comme convenu, choisissons comme courbe d'impact une circonférence Γ de rayon R, située dans un plan P' parallèle au plan P et lié à lui. Considérons un point M de la courbe d'impact défini par l'angle $\text{MOY}' = \alpha$ et un arc élémentaire $\text{MM}_1 = ds$.

Arrangeons-nous encore pour que chaque arc élémentaire dS de Γ reçoive un flux de liant $d\mathcal{F}$ émanant d'un petit rectangle $d\sigma$ situé dans le plan P et dont un des côtés ds est l'homologue de dS sur une circonférence γ de rayon r et tels que

$$r \cdot dS = R \cdot ds.$$

Arrangeons-nous enfin pour que le deuxième côté du rectangle ait une longueur ε définie par la relation

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cos \alpha$$

ε_0 étant une longueur fixe. Le flux instantané de liant qui sort de $d\sigma$ et qui se trouve par hypothèse réparti sur dS a pour valeur :

$$d\mathcal{F} = \mathcal{H} \cos \theta d\sigma = \mathcal{B} ds \varepsilon_0 \cos \alpha$$

ou encore :

$$d\mathcal{F} = \mathcal{B}_{\varepsilon_0} \frac{r}{R} dS \cos \alpha = K ds \cos \alpha$$

dans laquelle K est une constante définie par la relation :

$$K = \mathcal{H} \cos \theta \varepsilon_0 \frac{r}{R}$$

Or, nous avons démontré que dans le cas d'une courbe d'impact, dont l'équation par rapport aux deux axes de translation supposés fixes est $y = f(x)$ balayant le plan fixe d'épandage, la densité aréolaire de liant a pour valeur :

$$\Delta = \varphi \frac{dS}{dx} \cdot \frac{1}{V}$$

ou encore :

$$\Delta = \varphi \cdot \frac{1}{\cos \alpha} \cdot \frac{1}{V}$$

dans laquelle φ représente le flux instantané de liant reçu le long de

l'unité de longueur d'arc de la courbe d'impact, α étant défini par la relation :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dy}{dx}$$

Dans le cas envisagé, on a :

$$\varphi = \frac{d\mathcal{F}}{dS}$$

et on trouve finalement pour valeur de la densité aréolaire :

$$\bar{\Delta} = \frac{\mathcal{H} \cos \theta \varepsilon_0 r}{R d S} d S \cos \alpha \times \frac{1}{\cos \alpha} \cdot \frac{1}{V} = \frac{K}{V}$$

Si la vitesse de translation V de la courbe d'impact est uniforme, la densité aréolaire est elle-même uniforme.

La surface plane émettrice de liant qui constitue l'embouchure de l'émetteur est ainsi formée par la juxtaposition des aires élémentaires telles que $d\sigma$. Elle est limitée par une circonférence de rayon r et par la courbe lieu géométrique des hauteurs ε , telles que $\varepsilon = \varepsilon_0 \cos \alpha$. Cette courbe γ est définie en coordonnées polaires par l'équation :

$$\rho = r - \varepsilon_0 \cos \alpha,$$

en prenant le centre du cercle O comme pôle d'origine.

C'est une ellipse tangente intérieurement à la circonférence de rayon r dont le demi grand axe est r et dont le demi petit axe est $r - \varepsilon_0$.

Un émetteur de liant ainsi défini donnera bien une densité aréolaire constante sous réserve que :

- 1° la courbe d'impact se déplace d'un mouvement uniforme ;
- 2° le déplacement de la courbe d'impact soit parallèle à ses axes de coordonnées ;
- 3° la vitesse des particules de liant soit constante.

Cherchons maintenant comment peut être conçu un tel émetteur. Immobilisons la courbe d'impact et supposons que la vitesse initiale des particules de liant à la sortie de l'émetteur soit suffisante pour que l'on puisse considérer leur trajectoire comme rectiligne entre l'embouchure de l'émetteur et le sol (P'). Le jet de liant peut alors être considéré comme l'enveloppe de ces trajectoires, c'est-à-dire des vecteurs « vitesse initiale » $\mathcal{H}$ des particules. Comme nous avons supposé que ces vecteurs formaient un angle constant θ

avec le plan P, nous en déduisons que les tubes de courant à l'intérieur de l'émetteur et au voisinage de l'embouchure doivent être organisés de façon à faire eux-mêmes un angle constant avec l'autre demi-normale au plan P. Dans ces conditions, les tubes de courant ainsi définis ne peuvent être que des *hélices* circulaires au voisinage du plan P. La forme extérieure du jet sera l'enveloppe de ces tubes de courant devenus rectilignes. Géométriquement, cette enveloppe sera celle d'une droite s'appuyant constamment sur un cercle et faisant un angle constant avec une direction fixe : c'est la définition de l'*hyperboloïde de révolution*.

DENSITÉ ARÉOLAIRE VARIABLE - SURCHARGE LONGITUDINALE

Nous avons supposé que les axes de coordonnées $Ox Oy$ qui déterminent la courbe d'impact dans le plan horizontal P' étaient constituées d'une part par l'axe de translation Oy et par une perpendiculaire Ox à cet axe. Ces axes sont liés invariablement à l'émetteur situé dans le plan horizontal P et dont le centre est situé à une cote h au-dessus du plan Oxy .

Décalons la circonférence d'impact d'un angle μ , en faisant tourner l'émetteur de cet angle μ autour de Oy . Nous allons obtenir une nouvelle bande d'épandage avec une répartition de liant modifiée. La densité aréolaire le long d'une bande élémentaire longitudinale de largeur dx sera bien constante, mais la densité aréolaire variera suivant la position de la bande élémentaire considérée.

Nous nous proposons d'établir la loi de variation de la densité aréolaire en fonction de la position de cette bande élémentaire.

Soit $R \sin \beta$ la distance de la bande élémentaire à l'axe de translation Oy' . Le flux élémentaire $d\mathcal{F}$ reçu par l'arc d'impact élémentaire générateur, après décalage de l'angle μ du système émetteur a pour valeur :

$$d\mathcal{F} = \mathcal{H} \cos \theta \varepsilon_0 \frac{r}{R} dS \cos (\beta - \mu)$$

ce qui donne pour $\varphi = K \cos (\beta - \mu)$

et pour la densité aréolaire cherchée :

$$\Delta_{R \sin \beta} = \frac{K}{V} \cdot \frac{\cos (\beta - \mu)}{\cos \beta}$$

Cette relation définit ainsi une répartition transversale sinusoidale de liant en fonction :

1° de la position de la bande élémentaire ;

2° de l'angle de décalage de l'émetteur.

Il résulte également de cette relation que la densité aréolaire est maximum sur la bande $R \sin \beta$ quand l'angle de décalage correspondant est égal à β ; le maximum est :

$$\Delta_{\max} = \frac{K}{V \cos \beta}$$

Le maximum maximum de densité aréolaire est atteint pour

$\beta = \frac{\pi}{2}$, c'est-à-dire pour la bande riveraine et pour un décalage

$\mu = \frac{\pi}{2}$. On dispose ainsi d'un moyen simple permettant de faire varier la densité aréolaire entre certaines limites et de surcharger commodément les rives en liant.

LARGEUR DES BANDES D'ÉPANDAGE

La largeur L de la bande d'épandage obtenue avec l'émetteur envisagé est égale à $2R$. Remarquons que l'on a sensiblement :

$$R = h \operatorname{tg} \theta,$$

de sorte que

$$L = 2h \operatorname{tg} \theta.$$

La largeur de la bande d'épandage reste la même si l'on utilise un émetteur muni d'une ouverture angulaire de 180° au lieu de 360° . Elle serait réduite à la valeur :

$$L = 2h \operatorname{tg} \theta \cos \frac{\pi - \omega}{2},$$

si, au lieu de prendre émetteur ouvert sur 180° on utilisait un émetteur ouvert suivant un angle $\omega < 180^\circ$ et orienté convenablement (Courbe d'impact symétrique par rapport à l'axe de translation).

Pour un tel émetteur, décalé d'un angle μ la largeur de la bande d'épandage se réduira à la valeur :

$$L = 2h \operatorname{tg} \theta \cos \frac{\pi - \omega}{2} \cos \mu. \quad (1).$$

Mais nous venons de voir que, dans ce cas, il existera une densité aréolaire transversale sinusoïdale.

On obtiendra pratiquement une variation de la largeur de la bande d'épandage en faisant varier la cote h de l'émetteur au-dessus du plan d'épandage P' .

(1) Pour $\mu < \frac{\pi - \omega}{2}$, la largeur est minimum avec $\mu = \frac{\pi}{2}$.

Ce minimum a pour valeur $L = 2h \operatorname{tg} \theta (1 - \cos \frac{\omega}{2})$.

RÉALISATION DE L'ÉMETTEUR A DOSAGE UNIFORME.

Des considérations mathématiques qui précèdent, il résulte que les tubes de courant du liant à l'intérieur de l'émetteur sont des hélices circulaires. Ceci entraîne pour l'émetteur la forme d'un canal hélicoïdal d'une longueur suffisante pour que les tubes de courant soient bien organisés en hélices au voisinage de l'embouchure. De plus, la vitesse initiale des particules de liant débouchant dans l'atmosphère devra être maximum pour que les trajectoires des particules entre l'embouchure et le sol soient suffisamment tendues pour être considérées comme des droites. Le mouvement permanent étant établi, l'équation de continuité du débit implique pour l'embouchure une section droite minimum.

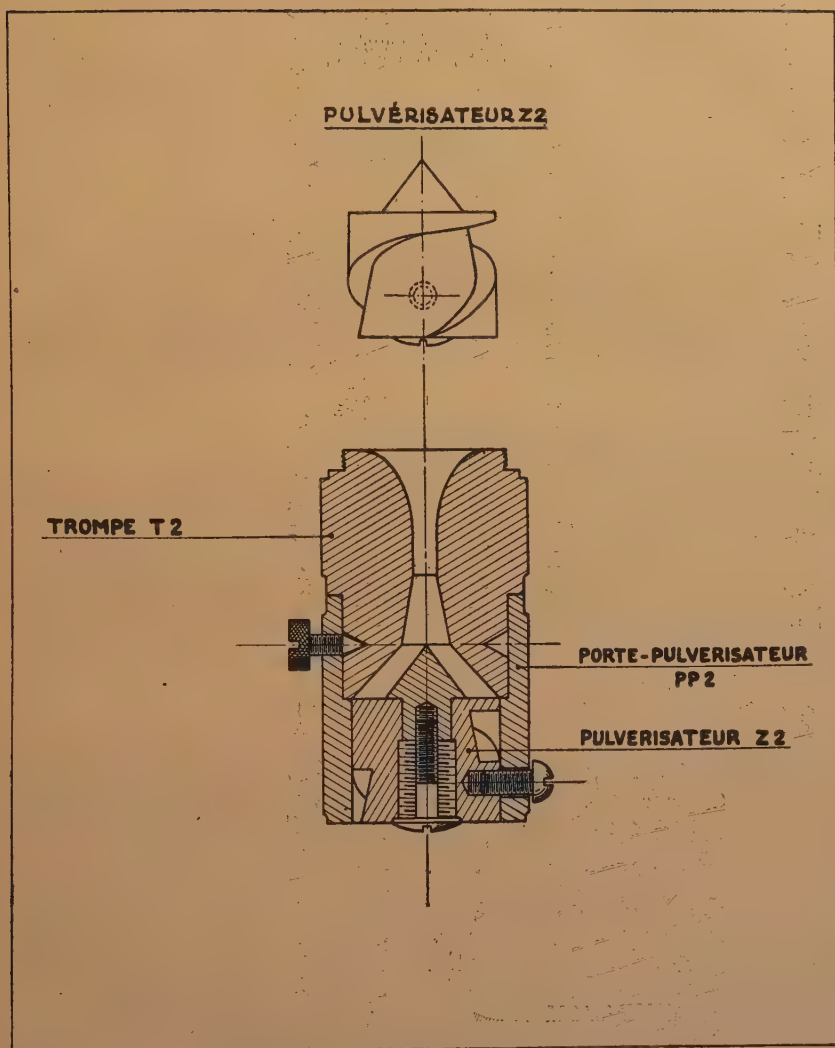
Le dispositif suivant est un exemple de réalisation répondant logiquement aux conditions imposées (fig. 10).

Un cylindre creux ou porte-pulvérisateur PP2 peut recevoir un noyau cylindrique ou pulvérisateur Z2 de même diamètre dans lequel est creusé superficiellement un canal hélicoïdal dont la profondeur va en décroissant. Le pas de l'hélicoïde qui engendre les filets hélicoïdaux de liant est d'autant plus petit que l'angle θ est plus grand.

Le canal hélicoïdal est ainsi limité :

- a) extérieurement par un cylindre circulaire ;
- b) intérieurement par un cône ayant pour directrice l'ellipse d'équation :

$$\rho = r - \varepsilon_0 \cos \alpha ;$$

*Fig. 10.*

Élévation et coupe d'un pulverisateur à noyau cylindrique en bronze avec canal hélicoïdal à profondeur décroissante et pointe amovible en acier.

c) latéralement par deux hélicoïdes à plan directeur parallèle à la base du cylindre.

Un liquide sous pression circulera dans ce canal de la manière suivante : à l'entrée, la section est maximum. La pression diminue avec la section pour aboutir à la pression atmosphérique à l'embouchure où la vitesse devient maximum.

Remarque. Nous avons établi que la courbe γ' se déduisait de la circonférence γ par la relation : $\rho = r - \varepsilon_0 \cos \alpha$.

L'expérience montre que pour obtenir une uniformité suffisante dans la plupart des cas, il suffit de remplacer l'ellipse $\rho = r - \varepsilon_0 \cos \alpha$ par la circonférence : $r' = r - \varepsilon_0$.

La pratique vérifie que l'uniformité ainsi obtenue est bien supérieure à celle donnée par la plupart des dispositifs connus.

Le calcul du flux instantané total de liant se simplifie beaucoup dans ce cas et il est facile d'établir qu'il a pour valeur numérique :

$$\mathcal{F} = \sqrt{2gP} \times \cos \theta \times \frac{\omega}{2\pi} \times \pi [r^2 - (r - \varepsilon)^2]$$

dans laquelle g est l'accélération de la pesanteur, P la pression du liant à l'entrée de l'ajutage.

Réalisation matérielle

La réalisation matérielle du pulvérisateur Z2 se fait dans un jet de bronze usiné au diamètre voulu et taillé à la fraiseuse universelle par inclinaison correcte de la fraise et du mandrin. L'inclinaison de la fraise donne le pas de l'hélicoïde, celle du mandrin règle l'angle au sommet du cône intérieur limitant le canal. Le canal peut être creusé à gauche ou à droite pour répondre à certaines considérations sur le sens de rotation des particules liquides.

Essais de l'ajutage — Jets d'eau hyperbolique

$$1^\circ \text{ Ouverture } \omega = 180^\circ$$

Lorsqu'on envoie de l'eau sous pression dans l'ajutage qui vient d'être décrit, on obtient un jet dont les caractéristiques répondent exactement aux prévisions de l'analyse. Il convient toutefois que

les conditions répondent bien aux hypothèses faites initialement, notamment en ce qui concerne la pression. Une pression d'eau de 1 kg/cm^2 à l'entrée du canal se révèle suffisante pour obtenir une nappe en portion d'hyperboloïde de révolution.

Pour des valeurs inférieures de la pression, la nappe liquide a une forme géométrique dans laquelle les forces capillaires jouent un rôle prépondérant sur les forces d'inertie. La nappe a l'aspect d'une surface gauche qui se résout en un jet cylindrique. Si l'on augmente progressivement la pression à l'entrée du canal, la surface du jet se modifie graduellement et tend vers l'hyperboloïde lorsque la trajectoire des particules d'eau est suffisamment tendue. Le jet est alors physiquement constitué par deux portions bien distinctes :

a) une portion continue, formée par une lame liquide dont l'épaisseur va en décroissant et dont l'aire croît avec la pression ;

b) une portion discontinue, formée d'une multitude de gouttelettes disposées suivant l'hyperboloïde. Ces gouttelettes proviennent de la lame liquide précédente dont la persistance, sous la forme d'une lame mince est rendue impossible par la tension superficielle de l'eau. Cette force superficielle tend à réduire l'aire de l'hyperboloïde de sorte que l'ouverture réelle ω' de l'hyperboloïde est plus petite que celle de l'ajutage $\omega' < \omega$. C'est pour cette raison que l'ouverture du pulvérisateur Z 2 doit être établie légèrement plus grande que le voudrait l'analyse.

L'ensemble du jet émet un son dont la continuité et la hauteur sont en relation avec le fonctionnement correct de l'ajutage.

Remplaçant l'eau par l'huile, les mêmes phénomènes se produisent mais ils sont rendus plus complexes du fait de la viscosité de l'huile employée et de ses caractéristiques superficielles. Il serait d'ailleurs fort instructif d'étudier le caractère d'une huile par l'analyse photographique de tels jets. Celle-ci dépasse le cadre restreint des applications que nous avons en vue dans le présent mémoire.

$$2^\circ \text{ Ouverture } \omega = 360^\circ$$

On ne saurait obtenir un jet hyperbolique entier au moyen d'un émetteur Z2. Un tel jet se réalise aisément à l'aide du cylindre spiral logarithmique S_1 dont une ouïe est bouchée complètement, l'autre étant limitée à une couronne circulaire mince. Si l'on envoie de

l'eau dans ce dispositif, ouverture annulaire en haut, on obtient une surface d'eau qui est un hyperboloïde de révolution complet qui se raccorde à un tore parabolique d'eau se résolvant en gouttes selon un processus décrit par Plateau.

De tels jets, dont la principale application semble être la joie des yeux, constituent de véritables fleurs d'eau à pétales changeants et cristallins dont la forme remarquable remplit de fraîcheur l'observateur le moins sensible aux phénomènes naturels.

Remarque. Nous avons démontré que la condition nécessaire et suffisante pour que la densité aréolaire soit constante est que le produit $\varphi \cdot \frac{ds}{dx} \cdot \frac{1}{V}$ reste constant. Nous avons supposé, dans ce qui

précède, que la vitesse de translation $V = \frac{\Delta y}{\Delta t}$ de la courbe d'impact était constante. Mais cette dernière hypothèse peut être écartée si la quantité φ est proportionnelle à V .

Cette condition n'est pratiquement possible qu'en rendant le flux φ proportionnel à la vitesse V , c'est-à-dire en choisissant un émetteur donnant un champ des vitesses non seulement uniforme, mais dont l'intensité est à chaque instant proportionnelle à la vitesse de translation de la courbe d'impact. La liaison des deux vitesses considérées a pour conséquence la proportionnalité de la vitesse du véhicule épandeur au débit total de l'émetteur et s'exprime par la relation :

$$\iint_{\Sigma} V_n d\sigma = a \cdot \frac{\Delta y}{\Delta t}$$

dans laquelle a est une constante.

Ce résultat paraît devoir être atteint simplement de la façon suivante : on alimente un émetteur convenable — du type décrit par exemple — à l'aide d'une pompe volumétrique entraînée par la roue même du véhicule portant l'émetteur. La densité aréolaire est alors fixe quelle que soit la manière dont évolue le véhicule. Pour la faire varier, il faut modifier le coefficient a en intercalant une boîte de vitesses entre la roue et la pompe volumétrique.

La difficulté se cache derrière la réalisation matérielle de cette solution simple. A notre connaissance, aucun constructeur ne l'a mise au point jusqu'ici.

L'ÉJECTEUR-TOURBILLON A JET HYPERBOLIQUE

Remplaçons le trompe T.U. (fig. 11) de l'éjecteur-tourbillon par la trompe T_2 et supprimons le manchon M_1G_1 . La trompe T_2 possède un divergent double dont la section droite a une forme annulaire d'aire croissante due à la présence d'une pointe conique interchangeable en acier. La section de passage du liquide ira ainsi en croissant régulièrement depuis le col de la tuyère T_2 jusqu'à l'entrée du canal hélicoïdal. L'équation de continuité du débit entraînera indirectement pour la pression disponible du mélange liquide au col de la trompe, une variation correspondante à celle de l'aire annulaire du divergent. Le mélange liquide s'organise dans le canal hélicoïdal qu'il quitte par l'embouchure dans des conditions qui ont été précédemment indiquées. Il convient cependant de préciser que l'aire de la section droite de l'embouchure de l'ajutage doit être au moins égale à l'aire de la section du col de la trompe. Le porte-pulvérisateur PP_2 est monté d'une façon orientable autour de l'axe de l'éjecteur-tourbillon. Il s'immobilise dans une position quelconque par blocage de trois vis disposées à 120° et dont les pointes s'appuient sur une rainure *ad hoc*. La courbe a sa position de symétrie naturelle pour engendrer une bande d'épandage d'épaisseur uniforme ou non.

Les résultats généraux susceptibles d'être acquis par l'ensemble du dispositif se résument brièvement dans les points suivants :

1° mélanger intimement deux liquides non miscibles : goudron-bitume-eau.

2° effectuer le mélange dans certaines proportions : changement de gicleur – changements de pressions ;

3° rester maître de la finesse de division du liquide dispersé – variation de l'énergie primaire ;

4° faire varier rapidement les concentrations. Utilisation des détendeurs ;

5° obtenir à volonté les deux systèmes dispersés. Moyens chimique – physique – géométrique – préséance ;

6° épandre le mélange suivant une bande de largeur et de densité variables – hauteur variable – décalage du porte-pulvérisateur.

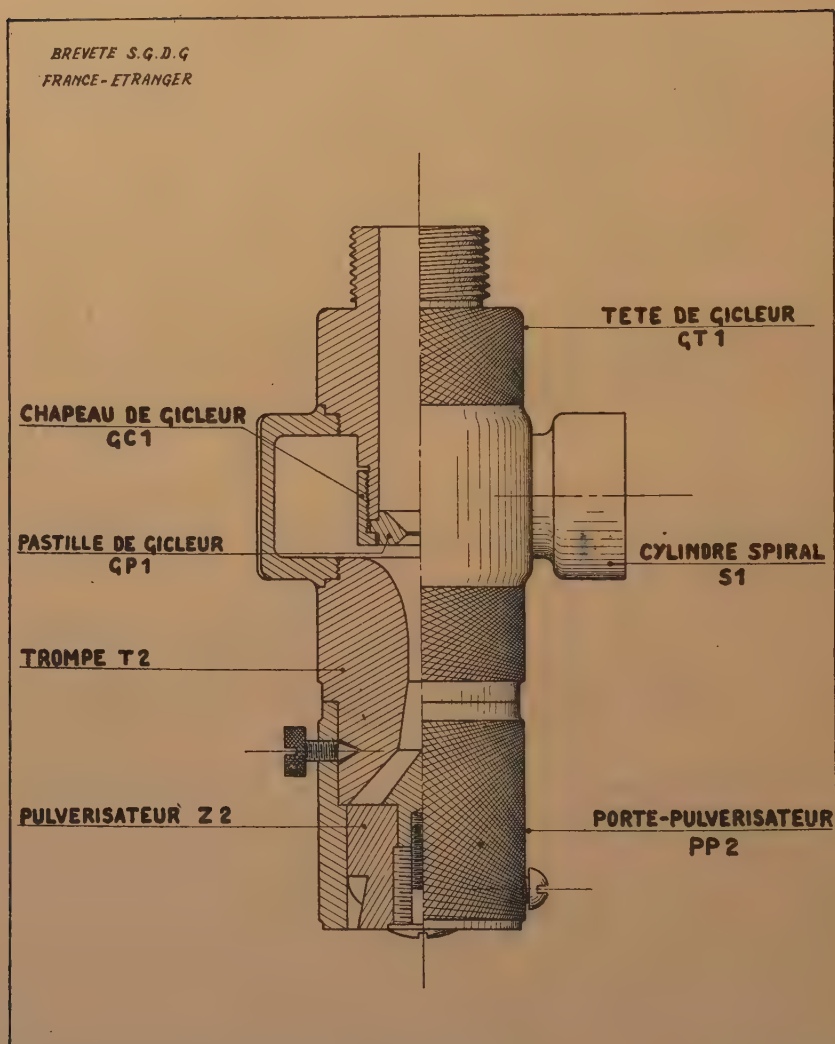


Fig. 11

Demi-coupe verticale d'un éjecteur-tourbillon avec
pulvérisateur à jet hyperbolique.

TROISIÈME PARTIE

APPLICATIONS INDUSTRIELLES DE L'ÉJECTEUR - TOURBILLON A LA PRÉPARATION ET A L'ÉPANDAGE SIMULTANÉS

« C'est un grand ornement que la
science et c'est un outil de merveilleux
service ».

MONTAIGNE.

CHAPITRE IX

Appareillage industriel

Les difficultés souvent rencontrées par le chercheur pour passer de la technique du laboratoire à la technique industrielle sont bien connues. Les lois de similitude ne sont généralement pas commodes à mettre en œuvre et le passage d'une application à l'autre est la plupart du temps hérissé de nombreuses difficultés qui viennent s'accumuler avec celles déjà rencontrées.

Il n'en a pas été ainsi pour l'éjecteur-tourbillon. Celui-ci possède, en effet, la caractéristique *fort rare* d'être à la fois l'appareil des essais au laboratoire et l'appareil utilisable industriellement sans modification. Aucune loi de similitude n'intervient dans le changement de destination et cette précieuse propriété a été mise largement à profit dans la technique industrielle.

Comme il sera exposé, seuls des détails indépendants des appareils qui viennent d'être décrits, ont fait l'objet de mises au point particulières, suggérées par la pratique elle-même. Des perfectionnements successifs et variés ont conduit à la création du matériel actuel avec sa technique propre.

Généralités sur l'appareillage industriel

Débit. — Les caractéristiques de l'éjecteur-tourbillon utilisant les basses pressions industrielles — quelques kilos — sont telles qu'un seul appareil est capable d'un débit total atteignant facilement trois mètres cube à l'heure. L'épandeuse que l'on se propose de construire aura ainsi un débit de liant multiple de ce débit unitaire en y adaptant le nombre n d'éjecteurs correspondants.

Largeur d'épandage. — A la hauteur d'un mètre au-dessus de la chaussée, la largeur de la bande d'épandage pour un décalage nul du porte-pulvérisateur est de l'ordre de quatre mètres. On fera tout naturellement varier cette hauteur pour obtenir la variation correspondante de largeur de liant épandu. Cette condition implique la superposition des bandes d'épandage propres à chaque éjecteur, c'est-à-dire que les n éjecteurs soient alignés en série suivant l'axe de translation du véhicule épandeur. Mais rien ne s'oppose à ce qu'on utilise les n éjecteurs alignés en parallèle suivant l'axe transversal au mouvement de translation du véhicule. La largeur totale de la bande d'épandage est alors formée par la juxtaposition des bandes propres à chaque éjecteur.

Vitesse du véhicule épandeur. — On sait que la densité aréolaire est proportionnelle au débit total de liant et en raison inverse de la vitesse de translation du véhicule. La connaissance de cette vitesse est donc de première importance pour l'appréciation de poids de liant épandu par mètre carré.

Importance de l'épandeuse. — Le volume des réservoirs des constituants peut être choisi arbitrairement. Il ne dépend que de la capacité de transport du véhicule adopté si le jumelage des citernes est disposé sur le véhicule. Mais il peut être également envisagé d'utiliser un véhicule et sa remorque pour véhiculer respectivement les deux citernes ; il s'agit alors de super-épanduses dont la nécessité ne pourrait se faire sentir que sur de très longs chantiers, aux colonies, par exemple.

Des épanduses de faible capacité correspondant au débit d'un seul éjecteur sont de nature à donner satisfaction aux besoins de chantiers de petite ou moyenne importance ou bien lorsqu'on désire préparer certains produits spéciaux pour l'enrobage de matériaux.

Générateur de gaz comprimés. — La puissance du compresseur employé pour mettre en charge les constituants sera proportionnelle au nombre n d'éjecteurs utilisés. Cette puissance devra toujours être calculée largement, contrairement aux errements adoptés pour les épanduses ordinaires donnant une pression qui varie souvent du triple au simple du début à la fin d'une vidange. La pression

demandée pour le gaz auxiliaire sera d'au moins 7 kilos par centimètre carré, ceci pour disposer d'une importante gamme de pressions détendues dans les citernes.

LE CAMION-PILOTE

Pour appliquer pratiquement les données générales précédentes, un camion automobile agencé spécialement pour la conduite des essais industriels sur route a été construit. Ce véhicule a reçu le nom de *camion-pilote*. Les très nombreux perfectionnements de détail apportés par la suite à son agencement général ont abouti au type actuellement en usage. D'une manière générale, les dispositifs accessoires du camion-pilote étaient surabondants par suite d'une trop grande marge de sécurité admise *a priori*. Les modifications ont toujours été apportées dans le sens des simplifications, et de l'allègement du poids mort. Les dispositifs suivants, tout d'abord adoptés, ont ensuite été supprimés ou modifiés, pour des raisons qui seront indiquées.

a) Le système de remplissage des citernes par le vide au moyen de l'aspiration du compresseur et d'un réservoir de sécurité a été supprimé. L'aspiration de liquides chauds par le vide n'est pas rationnelle physiquement. (Il est bien plus simple, la plupart du temps, de refouler les liquides chauds en les mettant en charge). Lors du premier remplissage des citernes par cette méthode, le vase de sécurité s'est rempli malgré une surveillance attentive, ce qui a failli coûter la vie au compresseur.

b) La rampe d'épandage avec sa caisse de réchauffage et sa suspension par câble et parallélogramme, maintenant constante la hauteur des éjecteurs au-dessus de la route quelle que soit la flèche des ressorts du camion, accomplit bien le rôle qui lui est dévolu ; elle a été cependant supprimée parce qu'elle est un poids mort important et ne permet pas de manœuvrer facilement les vannes ni de décaler aisément les porte-pulvérisateurs ; de plus, la variation de hauteur au moyen d'un treuil en cours de marche est une opération malaisée.

c) Un dispositif de chauffage avait été agencé dans chaque ci-

terne. Il était composé d'un tube en U classique disposé horizontalement et suspendu dans les citernes. Un brûleur à mazout avec réservoir de ce combustible et des tuyauteries d'alimentation et d'air comprimé débitait ses calories à l'intérieur du tube en U. Ce dispositif de chauffage a rendu quelques services pour les premiers essais. Il a été supprimé parce qu'il constituait, lui aussi, un poids mort important, prenait une grande place à l'intérieur des citernes, diminuant d'autant le volume utile transporté, comprenait des « impedimenta » encombrants, empêchait la circulation des suspensions de fillers et favorisait le dépôt de ces derniers.

La photographie n° 4 montre ces premières dispositions maintenant abandonnées.

ÉPANDEUSE

Équipement d'un châssis d'épandeuse

On choisira de préférence un châssis automobile pouvant transporter environ 6 tonnes de charge utile, équipement non compris. L'équipement d'une épandeuse de ce type comprendra :

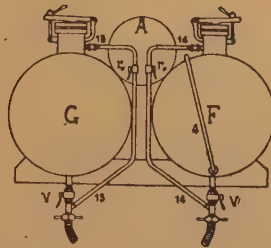
- 1° un jumelage de citernes ;
- 2° un compresseur d'air ;
- 3° un tableau de contrôle et de commandes ;
- 4° une rampe d'épandage à 4 ou 5 éjecteurs ;
- 5° des tuyauteries et vannes diverses.

Jumelage des citernes

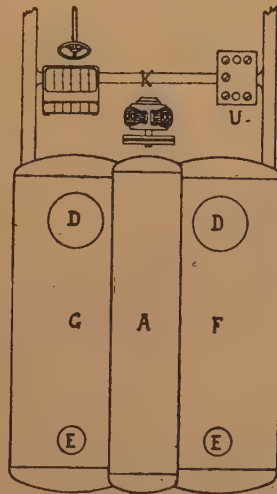
La capacité utile des citernes est prise de préférence égale à 2.500 litres par citerne. L'égalité de capacité des citernes implique des mélanges à volumes égaux de constituants, ce qui est souvent le cas le plus favorable. On choisira des citernes de *même résistance* à la pression de façon à éviter la spécialisation d'une citerne en citerne primaire ce qui impliquerait son remplissage tantôt avec la phase aqueuse, tantôt avec la phase huileuse. Les citernes sont établies de façon à résister à une pression effective de travail de 6 kilos au centimètre carré.

SCHEMA DE JUMELAGE DES CITERNES

VUE ARRIERE



VUE EN PLAN



F = FILLER
G = GOUDRON
K = COMPRESSEUR
U = TABLEAU

Fig. 12.

Le jumelage longitudinal des citernes sur un chassis automobile est une solution rationnelle pour une bonne répartition des charges.

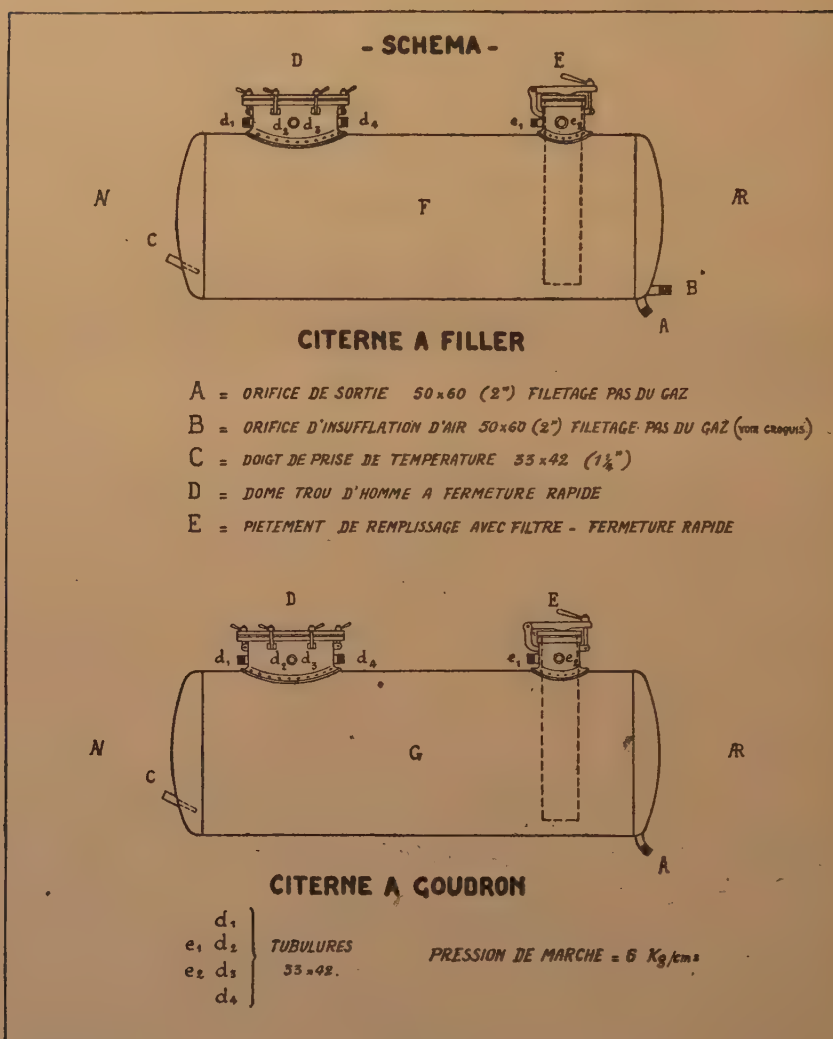


Fig. 13.

Des considérations de pureté des liquides rendent nécessaire la spécialisation des citernes. Les diverses ouvertures sont d'une manœuvre simple, rapide et sûre.

Le raisonnement et l'expérience prouvent que, parmi toutes les solutions possibles de jumelage, c'est la juxtaposition suivant la longueur qui est la meilleure. La pratique montre que les chassis s'accommodent parfaitement de cette solution. La forme adoptée est celle de cylindres circulaires avec fonds emboutis, fonds et viroles soudés électriquement. Des considérations de poids mort font éliminer les rivets. La figure 12 montre le schéma de jumelage des citernes. Sur cette figure ainsi que sur la figure 13 la citerne spécialisée pour la phase aqueuse a été dénommée citerne à filler pour des raisons indiquées plus loin. Elles sont identiques dans l'ensemble et ne diffèrent que par l'orifice d'insufflation d'air dans la citerne à suspensions F. Toutes deux sont munies d'un dôme D ou trou d'homme à couvercle étanche fermant rapidement, au moyen d'écrous à oreilles manœuvrables à l'aide d'un morceau de tube formant levier (l'utilisation d'outils spéciaux ayant été systématiquement écartée). Un piétement de remplissage E de 30 centimètres de diamètre, avec couvercle manœuvrable par un seul écrou à oreille, blocage par tube, est disposé côté arrière des citernes. Un grand filtre mobile disposé dans ce piétement empêche l'introduction de corps étrangers dans les citernes. Des tubes borgnes C sont soudés dans le fond avant des citernes et contiendront un liquide peu volatil à haute température, dans lequel viendront plonger des sondes thermométriques. Des manchons filetés sont soudés au trou d'homme D et au piétement E pour y assujettir les tuyauteries diverses dont l'utilité sera décrite plus loin.

Calorifugeage des citernes. — Les inconvénients du système de chauffage sur les citernes ont été indiqués. L'expérience a montré qu'il était bien préférable de calorifuger les citernes, les constituants étant introduits à la température. Avec des calorifuges de bonne qualité, l'abaissement de température a pu être ramené à 10° par 24 heures. Ce problème ne soulève pas de difficultés particulières. On peut prendre n'importe quel calorifuge, mais il sera judicieux de choisir un matériau de légèreté maximum.

Mise en charge des citernes. — Dans la citerne à goudron ou à hydrocarbures lourds, la mise en charge se fait à l'air comprimé ou aux gaz d'échappement comprimés, agissant sur la surface libre

au-dessus de laquelle il débouche par les manchons soudés au dôme et au piétement. Dans la citerne à phase aqueuse, les émulsifs devront être parfaitement dissous et les fillers parfaitement dispersés. L'homogénéité des solutions et des suspensions de fillers sera obtenue aisément par barbotage de l'air comprimé arrivant suivant la génératrice la plus basse de la citerne. Pratiquement, cette insufflation est réalisée au moyen d'un tube 4 (fig. 14 et 15). La rampe d'insufflation est assujettie au couvercle d'un piétement amovible commodément, sans outil. C'est un simple tube percé de trous à espacement décroissant. On obtiendra aisément un bon nettoyage de la citerne vide soit avec une lance à eau sous pression introduite par le piétement de barbotage, soit en raccordant la rampe d'insufflation à une canalisation d'eau sous pression. On règle l'agitation par le débit d'air injecté, s'échappant à l'atmosphère. Le brassage est très efficace et automatique. Lorsque la phase aqueuse contient des fillers minéraux lourds, il y a lieu de maintenir l'agitation à la fois au cours du transport et pendant les arrêts.

Plate-forme. — Une plate-forme arrière est disposée en-dessous des citernes. Elle permet d'assujettir la rampe au châssis ; elle est utilisée pour les manœuvres de la rampe et des vannes de vidange. Elle constitue un observatoire commode pour le travail et la surveillance du chantier.

COMPRESSEUR

Le débit d'air nécessaire est fonction du nombre des éjecteurs. L'expérience a montré que le nombre le plus favorable est cinq, donnant un débit de l'ordre de 15 mètres cube à l'heure. En comptant la moitié de ce débit à 3 kilos, l'autre moitié à 5 kilos (primaire), cela correspond à un volume d'air aspiré de 60 mètres cube à l'heure, soit 1.000 litres-minute. On choisira, en conséquence, un compresseur aspirant environ 1.000 litres et refoulant à 7 kilos au moins. Ces caractéristiques correspondent, par exemple, au compresseur-type 30, de la Société Ingersoll-Rand, d'une puissance de 10 CV. C'est un compresseur à refroidissement par air, à double étage, refoulant dans un réservoir auxiliaire A (fig. 12 et 21), disposé entre

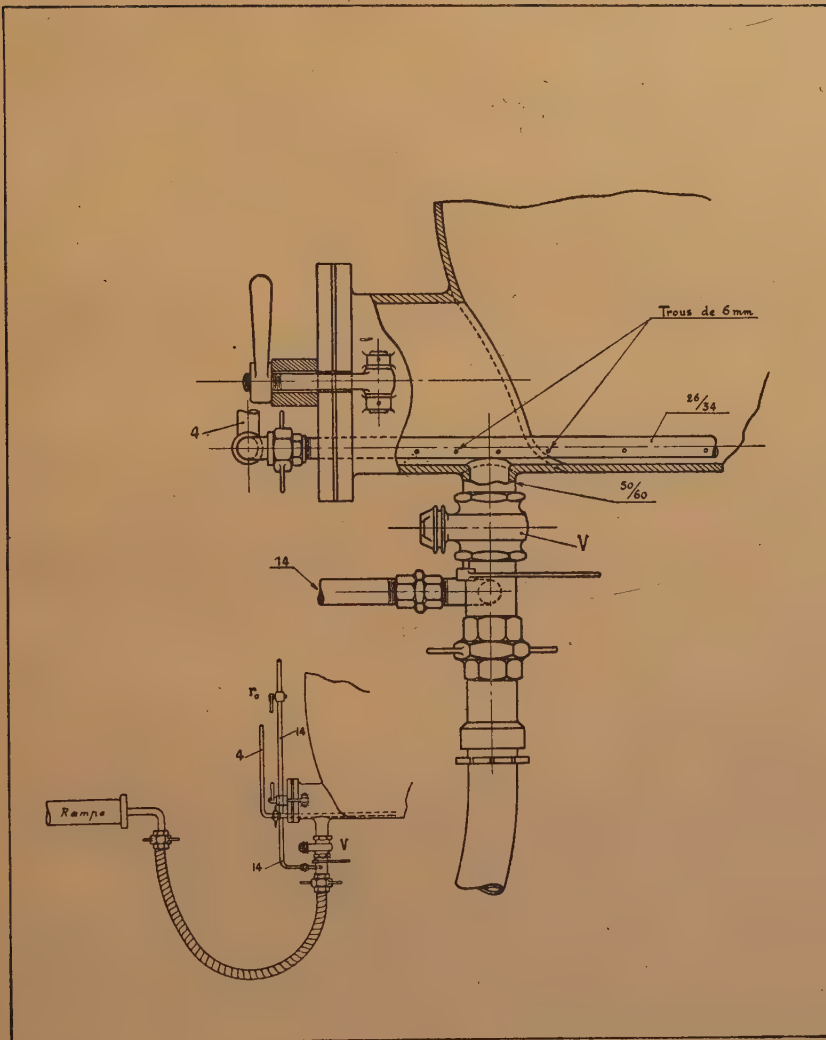


Fig. 14 et 15,

La rampe d'insufflation permet le brassage des suspensions et le nettoyage rapide de la citerne. Le raccord rampe-citerne est réalisé par un flexible démontable, sans outil, en caoutchouc de synthèse, résistant à la pression, à l'action chimique et à la température.

les citernes au-dessus, muni d'une soupape de sûreté. La constance de la pression est obtenue à 50 grammes près, par une valve pilote.

Sur le camion-pilote, le compresseur était entraîné par le camion lui-même. L'entraînement par le moteur du camion se fait par l'intermédiaire d'une chaîne et d'un arbre auxiliaire muni d'une poulie à gorges attaquant le volant par courroies trapézoïdales. Un embrayage à dents de loup commande le compresseur. L'inconvénient du dispositif est qu'à l'arrêt du véhicule, on est amené à utiliser le moteur pour entraîner le compresseur, ce qui est d'un mauvais rendement. En outre, pendant le transport, la chaîne de commande tourne à vide. C'est pourquoi il est préférable d'utiliser soit un moteur auxiliaire entraînant le compresseur, soit un compresseur Pescara à pistons libres. Ces groupes ne manquent pas sur le marché et ils ont atteint un grande sûreté de fonctionnement sans grande surveillance, sous réserve que le graissage soit bien assuré.

TABEAU DE CONTROLE ET DE COMMANDE

La nécessité nous est apparue de rassembler les appareils de mesures et la robinetterie d'entrée et de sortie d'air des citernes sur un même tableau placé à côté du conducteur du véhicule qui sera chargé de la surveillance et du réglage des opérations. Il importe, en effet, d'éviter toute erreur dans la manœuvre des divers robinets réglant le débit et la pression de l'air comprimé et des liquides aux citernes, aux collecteurs et aux conduits alimentant les éjecteurs tourbillons. A cet effet, les divers robinets-vannes R_1 , R_2 , R_3 , R_4 sont groupés derrière un disque monté librement sur un axe fixe creux, percé de plusieurs trous (fig. 16, 17 et 19). Les positions des robinets sur le châssis et des trous sur le disque sont choisies de façon que, pour différentes positions du disque, un ou plusieurs trous se trouvent en face des tiges de commande d'un ou plusieurs des robinets R. Chacune de ces tiges doit être vissée ou dévissée suivant que le robinet doit être fermé ou ouvert, et son extrémité comporte, à cet effet, un carré destiné à être tourné à l'aide d'une clé amovible. Le disque est placé de telle sorte que les tiges ne le laissent libre de tourner que lorsqu'elles sont toutes

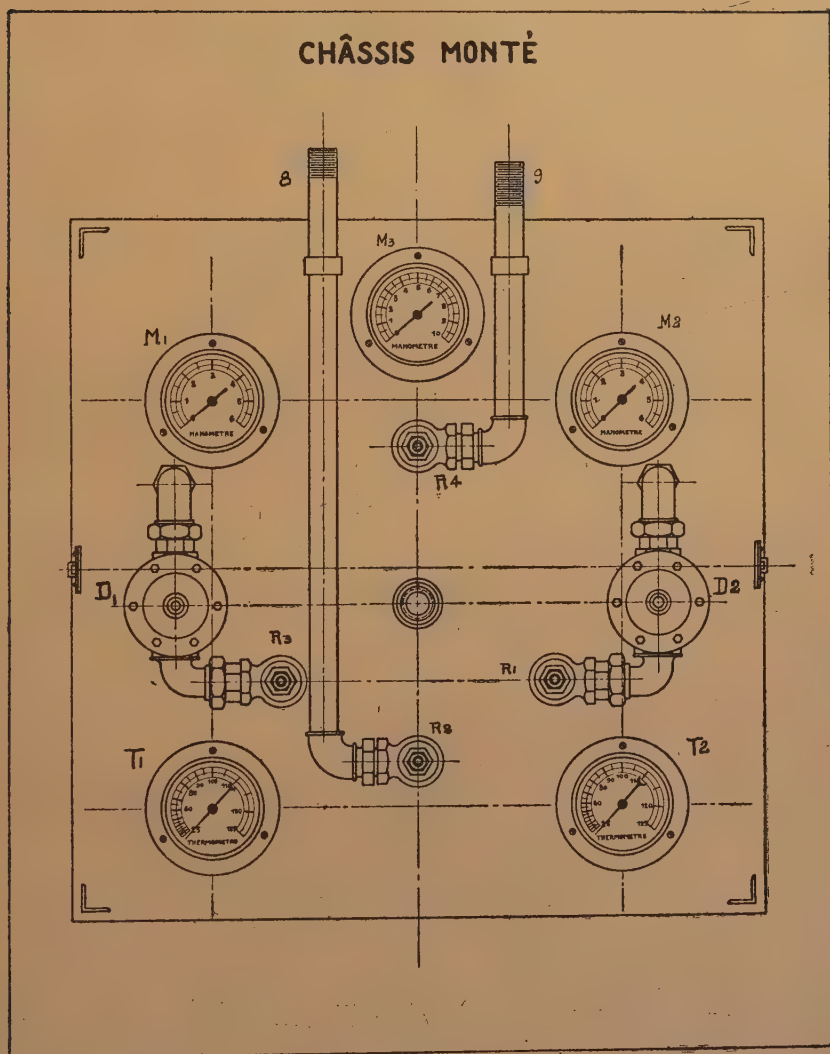


Fig. 16.

Le chassis reçoit 2 thermomètres T₁, T₂, trois manomètres M₁, M₂, M₃, 2 détendeurs D₁, D₂, 2 robinets vannes d'entrée des citernes R₁, R₃ et 2 robinets vannes d'évacuation R₂, R₄.

BREVETE S.G.D.G.
FRANCE-ÉTRANGER.

ENCLANCHEMENT DES ROBINETS

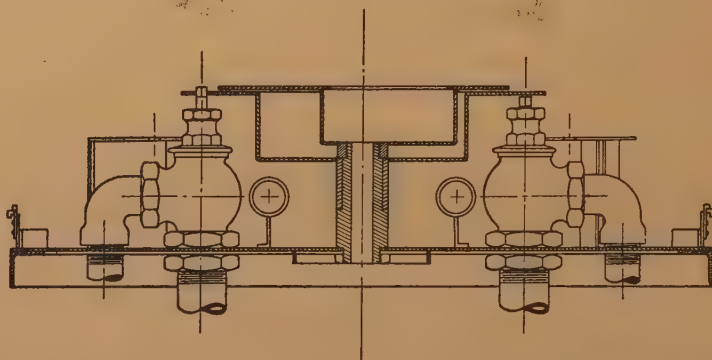


FIG. 17

DETENDEUR

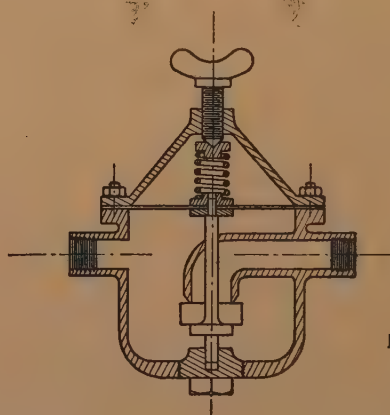


FIG. 18

Fig. 17 et 18.

L'enclanchement des robinets interdit catégoriquement toute fausse manœuvre. Les détendeurs sont simples et ne gèlent pas.

vissées à fond quand les robinets sont tous fermés. Par contre, lorsqu'on a ouvert un robinet à l'aide de la clé introduite dans un trou du disque, la tige est venue s'engager dans ce trou et enclanche le disque.

Grâce à une répartition judicieuse des robinets et des trous, le conducteur est guidé par ces derniers pour manœuvrer sans hésitation et sans risque d'erreur les robinets correspondant à telle ou telle opération ; à chaque position du disque, réperée par un index et une inscription appropriée, gravée sur le couvercle du tableau entourant le disque, il n'est possible d'ouvrir que les seuls robinets situés en face des trous et devant être seuls ouverts pour réaliser l'effet indiqué par l'inscription respective.

Sur la figure 17, on voit que le robinet ouvert immobilise le disque et que celui-ci empêche l'ouverture du robinet fermé. Pour effectuer une autre opération, il faudra commencer par fermer tous les robinets ouverts, tourner le disque dans une autre orientation, puis ouvrir les robinets démasqués par les trous. Toute fausse manœuvre est ainsi évitée pourvu que l'index soit amené sur l'inscription convenable du tableau. Les opérations prévues sur le tableau sont les suivantes :

- a) agitation dans la citerne à filler ;
- b) réglage des pressions dans les deux citernes ;
- c) épandage avec agitation complémentaire ;
- d) épandage ;
- e) évacuation des gaz des citernes.

Détendeurs. — Il est essentiel que les caractéristiques de fonctionnement des éjecteurs-tourbillon soient maintenues constantes pendant l'opération d'épandage. La régularité des concentrations, du débit, du mélange, de la largeur d'épandage dépendent, en effet, uniquement de la régularité des pressions. Celle-ci est obtenue par la détente de l'air auxiliaire du réservoir A. Deux détendeurs D_1 et D_2 (fig. 16) sont disposés à cet effet sur le tableau immédiatement en aval des robinets d'entrée d'air R_1 R_2 . Ils sont d'un type classique à membrane (fig. 18), clapet, ressort et vis de réglage. Ces détendeurs sont robustes, ne gèlent pas et se règlent très facilement à quelques dizaines de grammes près. Ils donnent des basses pressions facilement variables dans les deux sens.

Appareils de mesure. — La pression de l'air auxiliaire donnée par le compresseur est indiquée par un manomètre M_3 monté sur le chassis et démasqué par une ouverture circulaire dans le couvercle (fig. 19). Deux autres manomètres M_1 M_2 , disposés d'une manière analogue, au-dessus des détendeurs D_1 D_2 , indiquent les pressions primaire et secondaire. Ces appareils de mesure sont d'un modèle précis, gradués sur 270° et très sensibles. Les antennes manométriques primaire et secondaire aboutissent dans les dômes respectifs des citernes.

Un compte-tours de grand diamètre gradué sur 720° est relié à la boîte de vitesses par une prise standard traversant l'axe du disque à enclenchement ou au compresseur si celui-ci est entraîné par le véhicule. Ce compte-tours donne la vitesse de l'épandeuse avec une grande précision.

Deux thermomètres T_1 et T_2 ont leur sonde respective introduite dans les doigts prévus pour cet usage et disposés à l'avant des citernes. Leur graduation s'étend jusqu'à 180° C. pour la citerne à hydrocarbures et 120° C. pour l'autre citerne.

Couvercle et chassis sont recouverts d'une peinture cellulosique. Le couvercle est assujéti au chassis par une fermeture très maniable et repose sur quatre dés en caoutchouc, ce qui le rend insensible aux trépidations. L'accès des appareils de mesures, des détendeurs et de la robinetterie est ainsi très aisé. L'échappement des gaz comprimés des citernes est commandé par les robinets R_2 et R_4 qui envoient ces gaz dans l'atmosphère au-dessus de la cabine du conducteur. La photographie n° 5 montre la réalisation d'un tableau tel qu'il vient d'être décrit.

RAMPE D'ÉPANDAGE

La rampe d'épandage la plus récente est constituée par deux tubes ou collecteurs de grand diamètre (fig. 20), horizontaux et juxtaposés. Ces collecteurs qui amènent les liquides primaire et secondaire à mélanger et à pulvériser sont reliés respectivement aux citernes par des tuyaux souples. A l'intérieur de ces tubes collecteurs est placé un tube perforé servant à filtrer le liquide avant

qu'il s'échappe par les tubulures de départ aux éjecteurs-tourbillon. Ce tube est assemblé de façon étanche et facilement démontable, à l'une de ses extrémités, avec l'extrémité correspondante du collecteur; à l'autre extrémité, à une collerette formant bouchon amovible par l'intermédiaire d'un étrier et d'une vis de pression. Par ce moyen, le liquide ne peut parvenir au mélangeur qu'après avoir traversé la paroi du tube perforé et dont les perforations sont assez fines pour retenir toutes matières solides susceptibles d'engorger les organes de mélange et de pulvérisation. En raison de l'étendue de ses parois et du très grand nombre des perforations, le tube constitue un filtre n'opposant pas de résistance sensible au passage du liquide et ne créant pratiquement aucune perte de charge. D'autre part, ce filtre est très facile à enlever à la main sans outil et à nettoyer ou à remplacer (photo n° 6). Les éjecteurs au nombre de cinq de préférence, sont branchés sur les tubulures soudées aux collecteurs par des raccords union munis d'une oreille de démontage à la main, en dessous des collecteurs, de façon à intervertir facilement les entrées primaire et secondaire. Dans cette forme d'exécution, les ajutages de pulvérisation sont alignés suivant le plan vertical médian de l'un des deux collecteurs.

L'écartement des deux collecteurs est fixé par une tôle rectangulaire épaisse comportant deux galets de roulement à chacune de ses extrémités. Ces galets roulent à l'intérieur des ailes d'un fer U, disposé verticalement à l'extrémité de la plateforme arrière. Le mouvement vertical de va-et-vient réglant la largeur d'épandage est communiqué aux collecteurs par un écrou fixé à la tôle d'assemblage des collecteurs et une vis mobile commandée par un volant et pignon d'angle.

Ce dispositif par galets de roulement a remplacé avantageusement le dispositif à tube coulissant, beaucoup plus difficilement manœuvrable.

TUYAUTERIES

La recherche de la simplicité, de la maniabilité et d'une robinetterie réduite au minimum conduit au schéma de la tuyauterie de la figure 21. Le compresseur K débite dans le réservoir auxiliaire A

BREVETE S.G.D.G.
FRANCE-ETRANGER

RAMPE A EJECTEURS-TOURBILLON

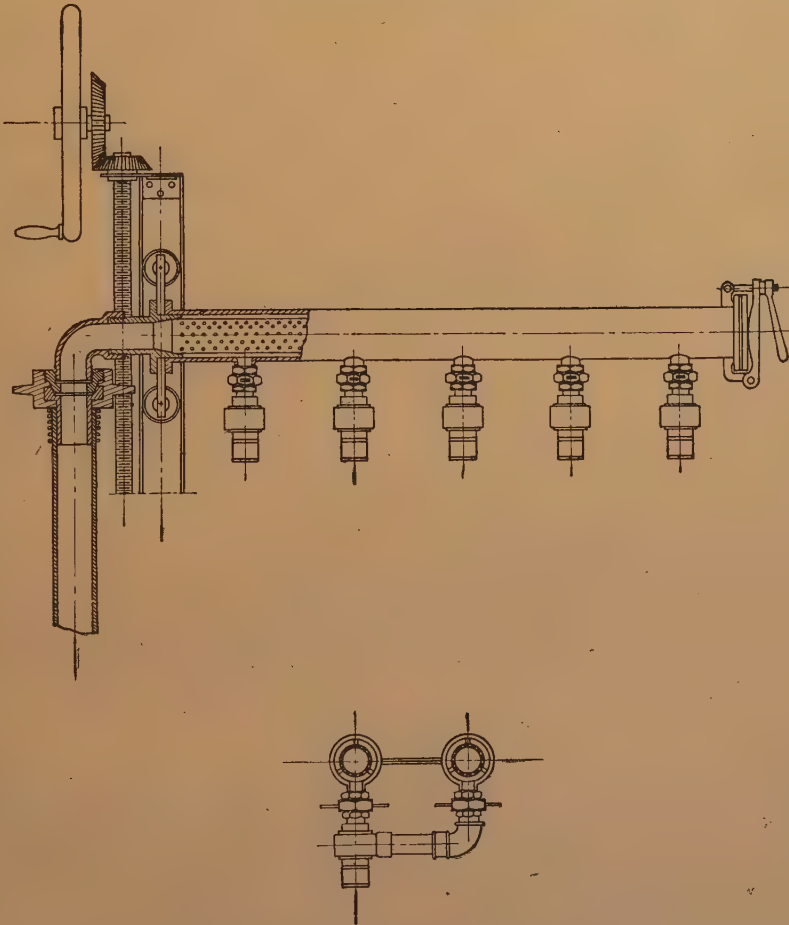


Fig. 20.

La rampe est réglable en hauteur au moyen du volant. Elle contient des filtres efficaces, d'un accès facile et rapidement interchangeable. Les éjecteurs tourbillons sont démontables à la main, le gicleur raccordable à volonté sur le primaire ou sur le secondaire.

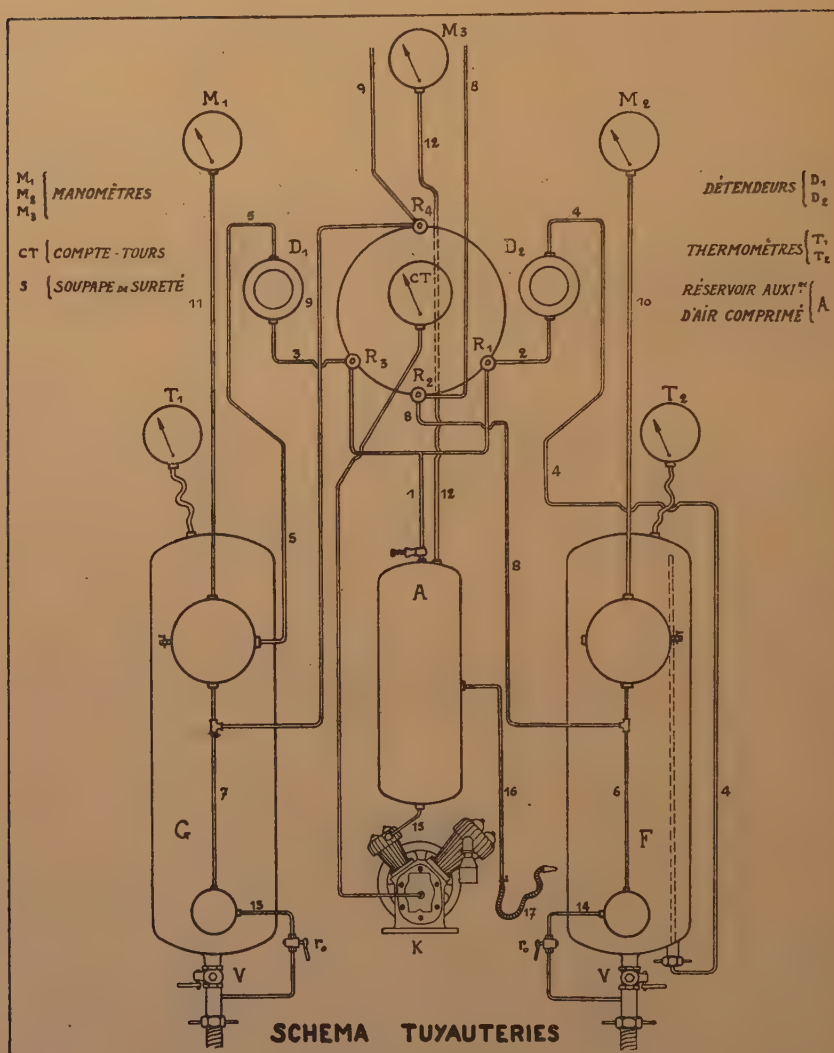


Fig. 21.

Toutes ces tuyauteries ne véhiculent que des gaz comprimés.
La plupart d'entre elles sont en caoutchouc par souci du silence.

par un tube 15. Le tuyau 1 amène l'air haute pression aux robinets R_1 et R_3 placés sur le tableau. Les tuyaux 4 et 5 amènent l'air détendu aux citernes F et G. Les tuyaux 8 et 9 sont les tuyaux d'échappement des gaz, commandé par les robinets R_2 et R_4 du tableau. Tous ces tuyaux sont en caoutchouc, par souci du silence et facilité de raccordement. Cette tuyauterie peut être disposée dans une seule gaine. Elle ne véhicule que des gaz.

Les tuyaux 13 et 14 raccordent le piétement d'entrée des liquides aux tuyaux souples de la rampe, en aval des vannes V de vidange. Un robinet R_0 est disposé sur chacune de ces tuyauteries. Les vannes V sont du type à manœuvre rapide, fermeture instantanée. Une prise d'air haute pression 16 permet de nettoyer rapidement les filtres avec un flexible 17 et une soufflette.

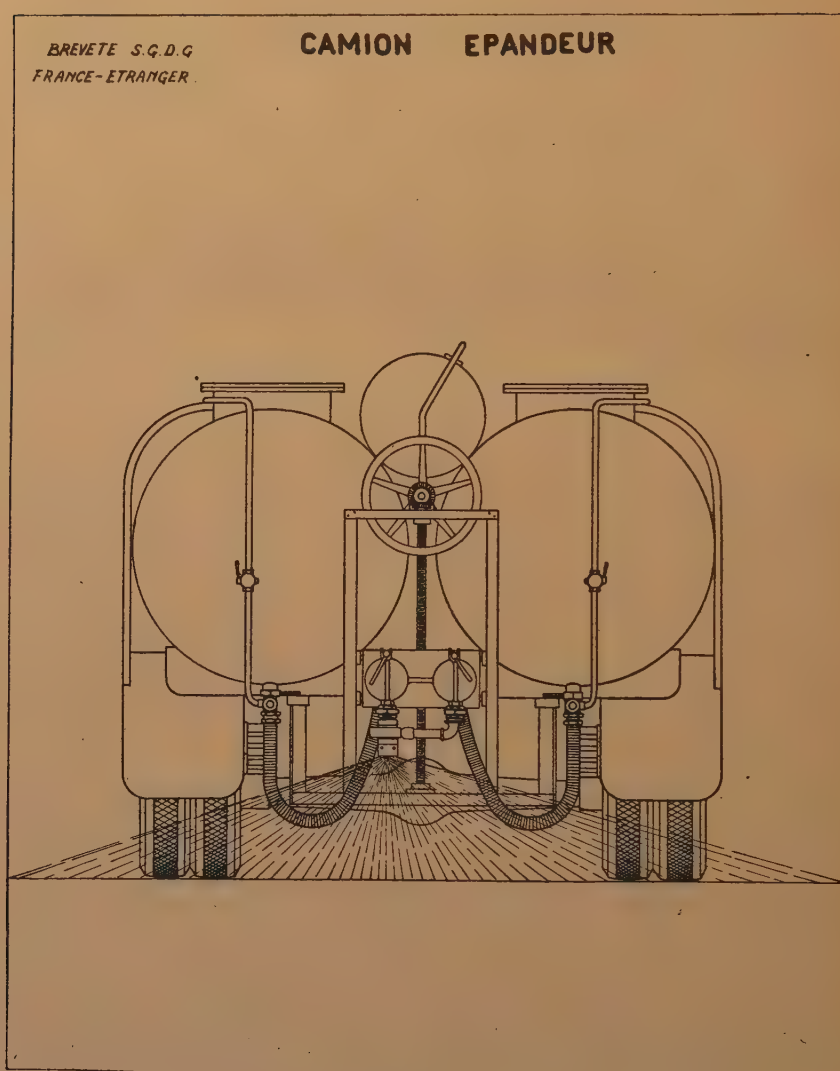
Flexibles. — Les tuyaux souples raccordant les vannes V aux collecteurs de la rampe doivent résister à la pression, se prêter à un faible rayon de courbure pour éviter les dimensions exagérées de la plate-forme arrière. En outre, ils doivent résister à la température (180°C.), ne pas être soluble dans les hydrocarbures et résister au passage de suspensions chaudes. Les coups de bélier résultant de l'ouverture instantanée doivent être sans action sur eux. Enfin, ils doivent se démonter facilement. Ces conditions sont bien remplies en utilisant des tuyaux souples de 50 $\frac{\text{mm}}{\text{m}}$ intérieur, en caoutchouc de synthèse, munis de raccords à oreilles à filetage rond. La figure 15 représente le raccordement du flexible à la citerne F et à la rampe.

Les dispositions précédentes sont visibles sur la figure 22, représentant une vue schématique de l'arrière d'un camion épandeur.

La photographie n° 7 est également une vue arrière d'une telle épandeuse, prise au cours d'essais à l'eau, avant d'être mise en service. Il s'agit d'une rampe à mouvement vertical coulissant, munie de quatre éjecteurs-tourbillon. Une échelle métallique a été assujettie à chaque citerne pour accéder facilement sur le dessus.

La photo n° 8 est une vue arrière d'une autre machine.

Accessoires. — Un petit coffret métallique a été aménagé sur le camion-pilote pour y ranger les éjecteurs-tourbillon pendant les stationnements prolongés ou pendant les longs parcours. Le coffret

*Fig. 22.*

Vue arrière du camion épandeur en fonctionnement

contient un solvant du goudron ou du bitume dans lequel baignent les appareils de façon à les maintenir en un constant état de propreté.

Un jeu de pastilles de gicleur calibrées et borgnes pour chaque éjecteur fait partie des accessoires prévus pour la modification éventuelle des caractéristiques de fonctionnement de la rampe.

Rechanges. — Les éjecteurs sont établis en bronze avec des épaisseurs suffisantes pour éviter toute détérioration accidentelle. Leur manipulation peut être faite sans risques par des mains brutales. Seule la manipulation des pièces démontées dont l'usinage est rigoureux appelle quelques précautions qui ne vont d'ailleurs pas au delà de celles demandées pour le démontage d'un carburateur. L'usure étant faible, il suffit de prévoir un éjecteur supplémentaire pour parer aux éventualités du chantier.

ÉQUIPAGE D'UNE ÉPANDEUSE

L'équipage d'une machine à grand rendement pour un chantier ordinaire comprend deux hommes : un chauffeur et un aide.

Le *chauffeur* est chargé de l'entretien et du graissage des moteurs et du compresseur. Il est responsable de la conduite du véhicule au cours de laquelle il maintient, si besoin est, l'agitation par battage d'air dans la citerne à filler. Il règle les pressions primaire et secondaire en agissant sur les détenteurs ; il règle également la vitesse du véhicule. Ces réglages généraux sont effectués depuis son siège grâce au tableau de contrôle et de commande.

L'*aide-chauffeur* est chargé du remplissage des citernes et de leur nettoyage. Au démarrage, il manœuvre les vannes dans l'ordre prescrit. Pour l'arrêt, cette manœuvre s'effectue conjointement avec celles d'air comprimé de façon à vider complètement les flexibles et assurer automatiquement le nettoyage des éjecteurs pour un nouveau départ. Au cours de l'épandage, il se tient sur la plateforme arrière (photo n° 11) pour ces manœuvres, d'où il règle la largeur de l'épandage par le volant de la rampe ainsi que le décalage d'un ou de plusieurs porte-pulvérisateurs, en vue des surcharges éventuelles.

Un tuyau porte-voix assure, au besoin, la liaison entre le chauffeur et son aide et permet le signalement d'incidents observés à l'avant ou à l'arrière.

L'aide-chauffeur qui est un manoeuvre non spécialisé est utilisable sur le chantier, pendant les temps d'arrêt, à d'autres travaux : le gravillonnage par exemple.

CHAPITRE X

La question du chauffage Travail au chantier

LA QUESTION DU CHAUFFAGE

L'approvisionnement de l'épandeuse en constituants se fait de préférence en un point d'eau peu éloigné du chantier d'épandage, de façon à réduire au minimum les tonnes kilométriques effectuées par ce camion épandeur. C'est en ce point que l'on emplit les citernes avec ces constituants, à des températures conformes à celles prévues par les fiches de laboratoire.

Il a été fait remarquer à ce sujet que l'inconvénient principal du procédé résidait dans le chauffage des constituants, sur place, au moment de l'emploi ; que ce chauffage entraînait une sujétion inopportune, notamment quand il s'agit d'émulsion de bitume ou de goudron dont l'intérêt primordial est d'être employé à froid. Il convient donc d'examiner de près cette objection et de voir si elle se justifie réellement.

S'il s'agit d'épandre des liants purs, ce que le matériel peut d'ailleurs faire parfaitement, que ce soit du goudron ou du bitume, il faut chauffer.

S'il s'agit de mélanges de goudron et de bitume, que ce soit sous une forme ou sous une autre, ces mélanges doivent être épandus à

chaud. Comme ces mélanges sont généralement préparés d'avance, nous observons que nous gagnons une « chauffe ». Ce gain est d'ailleurs indépendant des qualités des mélanges obtenus avec l'éjecteur-tourbillon. Notons à ce propos qu'avec la rampe qui a été décrite (fig. 20), les nappes élémentaires projetées par les différents ajustages peuvent être de composition différente selon les besoins. Dans la superposition de ces couches élémentaires, on peut former une nappe supérieure particulièrement riche en bitume de façon à ralentir l'évaporation ultérieure des huiles de goudron et retarder finalement le vieillissement.

S'il s'agit de fillériser des liants, l'opération s'effectue à chaud dans les deux cas, d'où équivalence au point de vue du seul chauffage. Si l'on veut fluxer des liants, l'opération ne peut être envisagée qu'à chaud.

Reste donc la question des émulsions de goudron ou de bitume. Si l'on examine les fonctions, préparation et épandage des émulsions, prises dans leur ensemble, c'est-à-dire si l'on part des constituants, force est d'admettre que la fonction préparation exige le chauffage dans tous les cas.

Dans le cas où les fonctions sont séparées, seule la fonction épandage ne nécessite plus de chauffage. Mais il nous faut constater que les calories dépensées pour préparer l'émulsion constituent une *perte pure*, sans aucune contre-partie. Lorsque les deux fonctions sont soudées au contraire, et c'est le cas dans le procédé décrit, les calories de fabrication jouent un rôle particulièrement utile dans l'obtention du résultat recherché. Le problème se limite ainsi de plus en plus et il se ramène à la comparaison des avantages et des inconvénients que présente l'emploi des émulsions chaudes ou froides. En ce qui concerne le goudron, l'émulsion stable n'existe qu'autant que l'on a augmenté la densité de la phase aqueuse par un artifice qui subsiste au moment de l'emploi, du fait de la sensible différence de densité des deux phases : 0,20 environ. La fabrication et l'épandage simultanés suppriment les sujétions dues à la conservation. L'utilisation des émulsions chaudes ou froides n'est avantageuse que du fait de la grande division de la matière active en micelles. La température d'une émulsion à la sortie d'un engin de préparation étant d'environ 80° C., on conçoit que la viscosité des micelles dispersées dans la phase aqueuse est bien moindre qu'à froid. Par

ailleurs, la chaleur spécifique considérable de l'eau maintient ces micelles à une température élevée bien plus longtemps que lors de l'emploi d'un liant pur. Il en résulte que les sphérules de liant se soudent plus facilement entre elles à cette température et que leur accrochage aux éléments solides en est bien facilité. Le problème du chauffage se simplifiera d'ailleurs beaucoup en approvisionnant le chantier en hydrocarbures au moyen de camions spéciaux de grande capacité, calorifugés, agencés pour le transport direct depuis les centres de production : raffinerie ou distillerie.

Si l'on utilise une phase aqueuse à base d'émulsif ou de filler, celle-ci sera préparée sur place, chauffée dans un bac auxiliaire à l'aide d'une chaudière classique (photo. n° 10).

LE TRAVAIL AU CHANTIER

Les citernes une fois chargées sont acheminées aussitôt au chantier d'épandage. Pendant le transport, on utilisera l'agitateur pneumatique si cela s'avère nécessaire. La chaussée que l'on se propose de traiter devra naturellement être préparée en vue de l'opération d'épandage, qu'il s'agisse d'un chantier de pénétration, semi-pénétration ou d'un revêtement superficiel. Le choix du liant dépendra de la nature de ce travail ; les émulsions directes, fines et peu concentrées sont indiquées dans les chantiers de pénétration. On choisira au contraire les émulsions inverses pour les tapis superficiels bien que cela ne soit pas la règle absolue. Les intempéries sont un facteur à considérer également ; la pluie étend les émulsions directes stables tandis qu'elle coule sur les émulsions inverses. Le fonctionnement de l'épandeuse au chantier est le même qu'au laboratoire, pourvu que les caractéristiques soient conformes aux indications données par les fiches correspondantes. La vitesse du véhicule est fixée d'après un calcul sommaire, puis rectifiée à la demande. Les jets hyperboliques sont bien réguliers, mais se déforment sous l'action d'un vent fort (photo. n° 11). Les bandes d'épandage sont d'une parfaite uniformité (photo. n° 12).

Quelques chantiers

Les applications industrielles du procédé de préparation et d'épandage simultanés des liants ont été réalisées dès 1937. Elles ont porté sur plus d'un millier de tonnes de produits divers épandus sur les routes de Bourgogne, de Franche-Comté, de Lorraine, d'Ile-de-France et du Poitou. D'autres réalisations ont été amorcées en Grande-Bretagne. Dans les applications françaises limitées par la guerre, on a eu surtout en vue les émulsions inverses de goudron-Filler et les émulsions directes de bitume. Parmi les fillers utilisés industriellement, citons le charbon, le filler S.B.C., les cendres de carnaux, les résidus de fabrication de la soude, de l'alumine, du sucre, du carbonate de soude.

Les résultats obtenus avec ces derniers fillers n'ont pas été aussi satisfaisants qu'avec les précédents ainsi qu'ils le laissaient tout d'abord prévoir. Cela tient pour une part à un pH très élevé de ces suspensions aqueuses et pour une autre part à la qualité inférieure du goudron employé. Un tonnage important d'émulsion de bitume a été également mis en œuvre selon la méthode décrite.

CONCLUSION

Nous avons essayé de décrire aussi clairement que possible un matériel essentiellement original qui a subi l'épreuve de l'expérience et qui permet d'envisager le problème de la préparation des liants routiers sous un aspect nouveau en le superposant à celui de leur épandage rationnel. Des méthodes neuves de travail sont ainsi mises à la disposition de l'industrie routière ; elles sont sans équivalence dans la technique actuelle.

Le Dr Nellensteyn, rapporteur général au VIII^e congrès de la route à la Haye, sur la question des progrès accomplis dans la préparation et l'utilisation des goudrons, des bitumes et des émulsions, a qualifié de « latine » cette innovation, lorsque nous avons eu l'honneur de la lui présenter au cours de ce congrès.

Le personnel qui a fait connaissance avec elle pour son utilisation industrielle y voit généralement un « système américain ».

Nous ne prétendons pas cependant avoir fait au lecteur des promesses d'alchimiste. La machine ne restitue en définitive que ce qu'on lui prête. Elle fait songer en cela à cette impératrice de toutes les Russies à qui le Tsar reprochait de ne lui donner que des filles et qui lui répondait simplement :

« Sire, je ne vous rends que ce que vous avez bien voulu me confier ».

Vu :

Le Président de thèse,
G. SIMON.

Vu et approuvé :

Dijon, le 9 février 1945,

Le Doyen de la Faculté des Sciences,
P. BUGNON.

Vu et permis d'imprimer :

Dijon, le 9 février 1945.

Le Recteur de l'Académie de Dijon,
G. DAUX.



Photo n° 1.

LE CYLINDRE SPIRAL
avec
dispositif optique d'observation

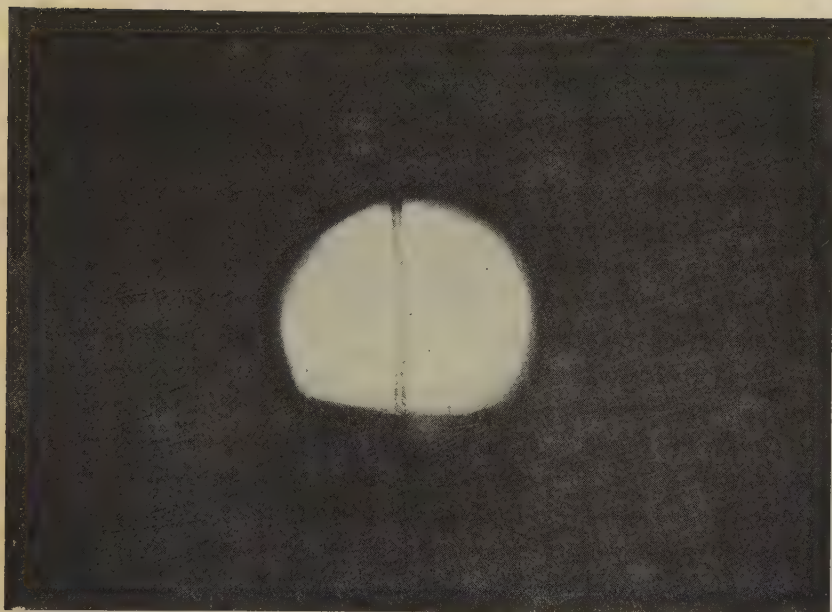


Photo n° 2.

ASPECT D'UN VORTEX DANS LE CYLINDRE SPIRAL

Pression d'eau dans le conduit amont : 4 kgs.
Grandeur naturelle.



Photo n° 3.

RÉSERVOIRS JUMELÉS
Pour essais au Laboratoire. Capacité , 30 litres,



Photo n° 4.

LE CAMION-PILOTE

Rampe d'épandage suspendue. Chauffage des citernes,
Charge utile ; 3 tonnes,

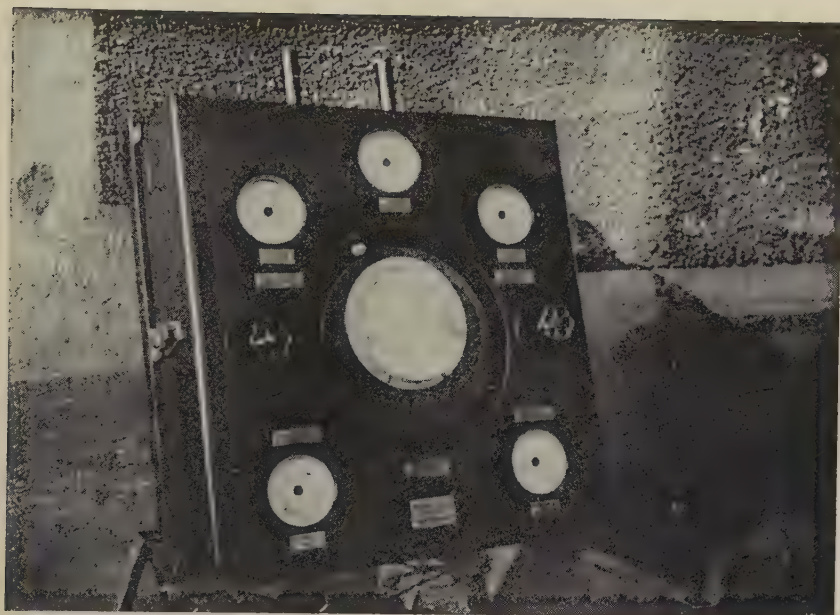


Photo n° 5.

TABEAU DE CONTROLE ET DE COMMANDE
Enclenchement des robinets.



Photo n° 6.

LA RAMPE ET SES FILTRES



Photo n° 7.

ESSAIS A L'EAU D'UNE ÉPANDEUSE

Citernes calorifugées.

Rampes à 4 éjecteurs-tourbillon.

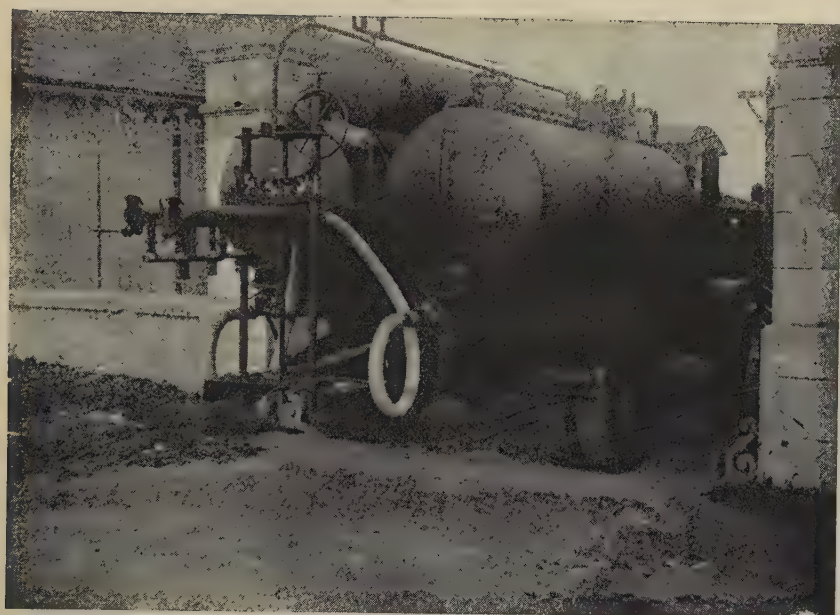


Photo n° 8

ÉPANDEUSE DE 6 TONNES
Citernes calorifugées.
Rampe à 4 éjecteurs-tourbillon.



Photo n° 2,

ÉPANDAGE PAR LE CAMION-PILOTE
d'une émulsion inverse de Goudron-Filler charbon,

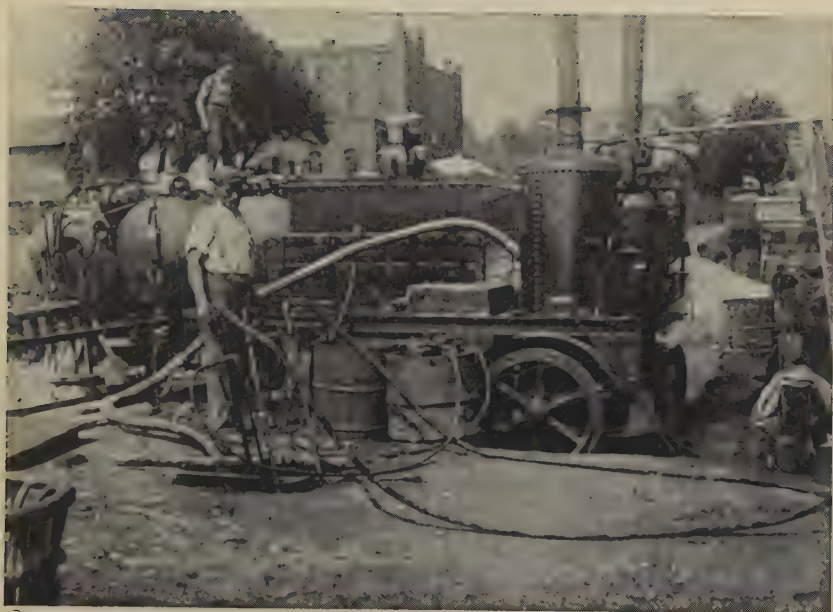


Photo n° 10.

CHANTIER D'APPROVISIONNEMENT



Photo n° 11.

TRAVAIL DE LA RAMPE



Photo n° 12.

CHANTIER D'ÉPANDAGE

BIBLIOGRAPHIE

H. BOUASSE. *Tourbillons. Forces acoustiques. Circulations diverses.* Paris, Delagrave, 1931, t. 1, 423 p.

M. A. ROSENBLATT. *Sur certains mouvements des liquides visqueux incompressibles.* Paris, Gauthier-Villars et C^{ie}, 1933, 48 p.

FAXEN et OLSSON. *Laminare Bewegung zäher Flüssigkeit in logarithmischen Spiralen* (Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik, t. 7, 1927).

H. BOUASSE. *Capillarité. Phénomènes superficiels.* Paris, Delagrave, 1924, 427 p.

Adrien FOCH. *Introduction à la mécanique des fluides.* Coll. Armand Colin, n° 148, Paris.

La Nature. Masson, éditeur, Paris.

CLAYTON. *The theory of emulsions.*

Otto LANGE. *La technique des émulsions* (Traduit d'après l'édition allemande et complétée par A. Cornillot). Paris, Dunod, 1934, 594 p.

Jean PERRIN. *Les atomes.* Paris, Alcan.

Paul COUDERC. *L'architecture de l'Univers.* Paris, Gauthier-Villars, 1941.

D^r Th. TEMME et D^r A. STELLIVAAG. *Bitumenemulsionen im Strassenbau.* Berlin, Lichterfelde, 1936.

Road Emulsion and Cold Bituminous. Road Association Ltd, London.

M. VÈZES et G. DUPONT. *Résines et térébenthines. Les industries dérivées.* Paris, Baillière et Fils, 1924, 656 p.

La Route (numéros spéciaux de « Science et Industrie »). Paris.

TABLE DES GRAVURES

Fig. 1	Cylindre spiral S_1	21
Fig. 2	Cylindre spiral avec objectif photographique	22
Fig. 3 et 4	Courbes	25-26
Fig. 5	Éjecteur-tourbillon	28
Fig. 6	Abaques	47
Fig. 7	Jumelage de Laboratoire	56
Fig. 8	Courbes	67
Fig. 9	Épure du jet	75
Fig. 10	Pulvérisateur Z_2	81
Fig. 11	Éjecteur-Tourbillon et pulvérisateur	86
Fig. 12	Schéma de jumelage des citernes	93
Fig. 13	Schéma des citernes	94
Fig. 14	Agitateur pneumatique	97
Fig. 15	Raccord rampe-citerne	97
Fig. 16	Chassis monté	99
Fig. 17	Enclanchement des robinets	100
Fig. 18	Détendeur	100
Fig. 19	Tableau de contrôle et de commande	102
Fig. 20	Rampe à éjecteurs-tourbillon	105
Fig. 21	Schéma des tuyauteries	106
Fig. 22	Camion épandeur	108

TABLE DES PHOTOGRAPHIES

Photo n° 1	Le cylindre spiral avec dispositif optique d'observation.
Photo n° 2	Aspect d'un vortex dans le cylindre spiral.
Photo n° 3	Réservoirs jumelés pour essais au laboratoire.
Photo n° 4	Le camion-pilote.
Photo n° 5	Tableau de contrôle et de commande.
Photo n° 6	La rampe et ses filtres.
Photo n° 7	Essais à l'eau d'une épandeuse.
Photo n° 8	Épandeuse de 6 tonnes.
Photo n° 9	Épandage d'une émulsion inverse.
Photo n° 10	Chantier d'approvisionnement.
Photo n° 11	Travail de la rampe.
Photo n° 12	Chantier d'épandage.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	7
--------------------	---

PREMIÈRE PARTIE

L'éjecteur-tourbillon

Chapitre premier.	
Les systèmes spirales	11
Chapitre II	
Mouvement d'un fluide parfait en spirale logarithmique....	16
Utilité hydraulique du mouvement	19
Réflexions et observations sur le mouvement tourbillon- naire de l'eau	24
Chapitre III	
Application à un émulseur : l'éjecteur-tourbillon.....	29
Généralités sur la nature des mélanges obtenus	35
Chapitre IV.	
Cas des émulsions	37
Réflexions sur la finesse de la division	39
Calcul des concentrations. — Abaques.....	43
Chapitre V	
Résultats expérimentaux	48
Considérations sur les goudrons et les bitumes.....	49
Les fillers et leurs suspensions	49
Émulsions filler	52
Les émulsifs ou agents émulsifiants	53
Chapitre VI	
Appareillage et essais de laboratoire	55
Les essais au laboratoire	55
Observations des résultats. Modification des caracté- ristiques	57
Commentaires sur quelques essais	58
Fiches d'essai de laboratoire	60

DEUXIÈME PARTIE

Etude analytique de l'épandage des liants pour routes

Chapitre VII

Généralités	65
Cas d'une courbe d'impact	66
Cas d'une aire d'impact	68
Les pulvérisateurs	72

Chapitre VIII

Recherche d'une solution rationnelle simple	74
Densité aréolaire variable. Surcharge longitudinale	78
Largeur des bandes d'épandage	79
Réalisation de l'émetteur à dosage uniforme	80
L'éjecteur-tourbillon à jet hyperbolique	85

TROISIÈME PARTIE

*Applications industrielles de l'éjecteur-tourbillon
à la préparation et à l'épandage simultanés*

Chapitre IX

Appareillage industriel	89
Le camion-pilote	91
Épandeuse	92
Compresseur	96
Tableau de contrôle et de commande	98
Rampe d'épandage	103
Tuyauteries	104
Équipage d'une épandeuse	109

Chapitre X

La question du chauffage	111
Le travail au chantier	113

CONCLUSION	115
------------------	-----

PHOTOGRAPHIES	(en hors-texte)
---------------------	-----------------

BIBLIOGRAPHIE	117
---------------------	-----

TABLE des gravures	118
--------------------------	-----

TABLE des photos	118
------------------------	-----

